ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE GRUPOS DE PILOTES EN ARCILLAS DE BOGOTÁ A PARTIR DE SIMULACIONES NUMÉRICAS

Autor
Claudy Jean Baptiste

Tutor
PhD. Jorge Arturo Pineda Jaimes

Universidad Distrital Francisco José De Caldas
Maestría en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
Abril de 2022

Este trabajo fue realizado al interior del grupo de investigación GIDPAD, en la línea de investigación: Análisis y diseño por confiabilidad, modelación numérica de sistemas.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres, Claudette Gustin y Muller Jean Baptiste, por la vida que me dieron, por tanto amor, por tantas enseñanzas, por su incansable labor al educarme y por creer siempre en mí.

AGRADECIMIENTOS

Primero, a Dios, por su grandeza y su bondad, por guiarme y fortalecerme en todos los momentos, y por permitirme lograr esta meta.

Al ICETEX, por su programa de becas para extranjeros que me permitió realizar mis estudios de Maestría en Ingeniería Civil en Colombia.

Al personal de la Coordinación de Programa de Maestría en Ingeniería Civil de la Facultad Tecnología de la Universidad Distrital de Francisco José de Caldas por las atenciones prestadas y colaboración en las etapas de este estudio.

A PhD. Jorge Arturo Pineda Jaimes, director del presente trabajo de maestría, por la orientación, ayuda y tiempo que me brindó para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Al Grupo de Investigación en Atención y Prevención de Desastres, Riesgos y Resiliencia (GIDPAD), por el otorgamiento de la licencia del software Midas GTS NX que me permitió realizar las simulaciones numéricas de este trabajo de investigación.

A mi familia, por todo el apoyo y ánimo que me ha dado durante el periodo de los estudios a pesar de los 1500Km que nos separan.

Contenido

DEDICATORIA 3
AGRADECIMIENTOS 4
RESUMEN 14
PALABRAS CLAVE 14
ABSTRACT 15
KEYWORDS 15
INTRODUCCIÓN 16
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN / OBJETO DE ESTUDIO 18
1.1 Antecedentes y contexto del problema 18
1.2 Planteamiento del problema de investigación u objeto de estudio 20
1.3 Justificación 21
2. OBJETIVOS 23
2.1 Objetivo general 23
2.2 Objetivos específicos 23
3. MARCO DE REFERENCIA 24
3.1 Estado del arte 24
3.1.1 Estudio de campo en los suelos lacustres de Bogotá 24
3.1.2 Investigaciones de modelos numéricos 26
3.2 Marco teórico 36
3.2.1 Simulación numérica 36
3.2.2 Pilotes 37
3.2.3 Deformaciones 45
3.3 sintesis 45
4. METODOLOGÍA 47
4.1 Caracterización de los suelos arcillosos de la sabana de bogotá 47
4.1.1 Propiedades Geotécnicas a partir de Fuentes de Información Secundaria . 47
4.1.2 Perfil de Análisis Geotécnico Definido para este Trabajo 50
4.2 Cargas aplicadas a los pilotes en los modelos de simulación numérica 53
4.2.1 Cargas axiales 53
4.2.2 Cargas laterales 56
4.3 Modelación numérica 57
4.3.1 Software 57

4.3.2 Modelación ... 57
4.3.3 Validación de la metodología ... 68
4.3.4 Casos Considerados en la Simulación Numérica ... 70
4.4 Sintesis ... 72
5. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE GRUPOS DE PILOTES EN LAS ARCILLAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ ... 73
5.1 Grupos de pilotes bajo cargas verticales ... 73
5.1.1 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 ... 73
5.1.2 Grupos de pilotes rectangular RE_3x3 ... 79
5.1.3 Grupos de pilotes cuadricular CU_3x3 ... 85
5.1.4 Grupos de pilotes circular CIR_8P ... 91
5.1.5 Grupos de pilotes circular CIR_9P ... 97
5.2 Grupos de pilotes ante cargas laterales ... 103
5.2.1 Pilotes individuales ... 103
5.2.2 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 ... 107
5.2.3 Grupos de pilotes rectangular RE_3x3 ... 112
5.2.4 Grupos de pilotes cuadricular CU_3x3 ... 117
5.2.5 Grupos de pilotes circular CIR_8P ... 123
5.2.6 Grupos de pilotes circular CIR_9P ... 127
5.2.7 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a 200 KN de carga lateral 133
5.2.8 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a 800KN de carga lateral 137
5.3 Grupos de pilotes ante combinaciones de cargas verticales y laterales ... 141
5.3.1 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a cargas gravitacionales y a 200KN de carga lateral ... 141
5.3.2 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a cargas gravitacionales y a 800KN de carga lateral ... 144
5.4 Análisis de los resultados de las simulaciones ... 146
5.4.1 Eficiencia de grupos de pilotes ... 147
5.4.2 Desplazamientos verticales promedio de grupos de pilotes ... 152
5.4.3 Desplazamientos laterales promedio de grupos de pilotes ... 158
5.4.4 Momentos flectores ... 165
5.4.5 Análisis estadístico de los datos de módulo de reacción de los suelos ... 168
5.5 Sintesis ... 169
6. CONCLUSIONES ... 171

7. RECOMENDACIONES 173
8. REFERENCIAS 174

Lista de figuras

Figura 1. Comparación entre (a) Límite plástico, Límite líquido, y Contenido de agua; (b) Índice de consistencia; Cohesión sin drenaje; and (d) Estratigrafía. 19
Figura 2. Curvas esfuerzo-desplazamiento para carga estática en pilotes pre-excavados obtenidas a partir de los ensayos..... 25
Figura 3. Curvas esfuerzo-desplazamiento para carga estática en pilotes hincados obtenidas a partir de los ensayos..... 25
Figura 4. Capacidad ultima de pilotes obtenidas en las pruebas de carga. 26
Figura 5. Respuestas de pilotes con diferentes valores de diámetro para Δ_B=30mm 27
Figura 6. Respuestas de pilotes con diferentes valores de Kr para Δ_B=30 mm 27
Figura 7. Configuraciones de cargas y de grupos de pilotes 28
Figura 8. Efecto de espaciamiento de pilotes en el asentamiento diferencial 28
Figura 9. Comparación de resultados experimentales y numéricos para la placa (R) y el sistema de placa pilote (PR) 29
Figura 10. Efecto de Ep/Es en el asentamiento vertical 30
Figura 11. Asentamiento máximo de la placa, UCPRF y CPRF 31
Figura 12. Asentamiento frente a número de pilotes 31
Figura 13. Resultados de grupos perimetrales con un pilote en el centro..... 32
Figura 14. Carga asentamiento del sistema con pilotes de 20m de longitud. 33
Figura 15. Efecto de la longitud del pilote sobre la variación del asentamiento y el reparto de carga del pilote. 34
Figura 16. Influencia del número de pilotes sobre la variación del asentamiento y el reparto de carga del pilote. 35
Figura 17. Influencia de la rigidez del suelo en el asentamiento..... 35
Figura 18. Condiciones para el uso de pilotes de cimentación 38
Figura 19. Factor de capacidad de carga de Meyerhof, $, Nq *$ 39
Figura 20. Variación de α con la cohesión no drenada de la arcilla 40
Figura 21. Curvas de carga vs asentamiento 41
Figura 22. Grupos de pilote..... 43
Figura 23. Parámetros de caracterización de los suelos lacustres 200 48
Figura 24. (a) Perdida por ignición (b) Proporción de partículas con tamaños inferiores a 2 mm (c) Peso unitario (d) Cohesión no drenada..... 49
Figura 25. qc, Resistencia del cono por punta; fs, Fricción lateral medida; u2, Presión de poros 50
Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de modelación 58
Figura 27. Creación de volúmenes y líneas para los modelos..... 59
Figura 28. Caras compartidas de los volúmenes creados en el modelo 59
Figura 29. Creación de materiales en Midas GTS NX 60
Figura 30. Creación de propiedad tipo 1D para los modelos 61
Figura 31. Realización de enmallado de suelos para los modelos 62
Figura 32. Realización de enmallado de pilotes para los modelos 63
Figura 33. Enmallado de suelos y pilotes de los modelos 63
Figura 34. Aplicación de condición de frontera y peso propio a los modelos 64
Figura 35. Cargas gravitacionales aplicadas a los pilotes 65
Figura 36. Fases constructivas de los modelos..... 66
Figura 37. Resultados de desplazamientos verticales en la parte superior de los pilotes 67
Figura 38. Resultados de desplazamientos verticales alrededor de los pilotes 67

Figura 39. Resultados de desplazamientos lateral y momentos flectores en pilotes 68
Figura 40. Configuración de grupo 71

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados de eficiencia de grupos de cuadricula. 32
Tabla 2. Variación de λ con L 41
Tabla 3. Resumen de parámetros de diseño en lacustre 200 49
Tabla 4. Perfil geotécnico promedio de los suelos lacustres de Bogotá..... 51
Tabla 5. Perfil geotécnico promedio de los suelos lacustres de Bogotá..... 52
Tabla 6. Resistencia por fricción para pilotes de 25m de longitud..... 54
Tabla 7. Resistencia por fricción para pilotes de 30m de longitud..... 54
Tabla 8. Resistencia por fricción para pilotes de 35m de longitud..... 54
Tabla 9. Resistencia por fricción para pilotes de 40m de longitud..... 55
Tabla 10. Resistencia por fricción para pilotes de 45m de longitud..... 55
Tabla 11. Resistencia por fricción para pilotes de 50m de longitud..... 55
Tabla 12. Cargas axiales aplicadas 56
Tabla 13. Propiedades geométricas, cargas aplicadas y desplazamiento de los pilotes .. 70
Tabla 14. Modelos analizados 72
Tabla 15. Carga última (KN) de P-1, P-4 y de RE_2x2 para D=0.40 m..... 74
Tabla 16. Eficiencia de grupos RE_2X2 para D=0.40 m 74
Tabla 17. Eficiencia de grupos RE_2X2 para D=0.60 m 75
Tabla 18. Carga última (KN) de P-1, P-4 y de RE_2x2 para D=0.60 m..... 76
Tabla 19. Eficiencia de grupos RE_2X2 para D=0.80 m 77
Tabla 20. Carga última (KN) de P-1, P-4 y de RE_2x2 para D=0.80 m..... 78
Tabla 21. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.40 m 79
Tabla 22. Carga última (KN) de P-4, P-8 y de RE_3x3 para D=0.40 m..... 80
Tabla 23. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.60 m 81
Tabla 24. Carga última (KN) de P-4, P-8 y de RE_3x3 para D=0.60 m..... 82
Tabla 25. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.80m 83
Tabla 26. Carga última (KN) de P-4, P-8 y de RE_3x3 para D=0.80m..... 84
Tabla 27. Carga última (KN) de P-5, P-4, P-9 y de CU_3x3 para D=0.40m..... 86
Tabla 28. Eficiencia de grupos CU_3x3 para D=0.40m 86
Tabla 29. Eficiencia de grupos CU_3x3 para D=0.60m 87
Tabla 30. Carga última (KN) de P-5, P-4, P-9 y de CU_3x3 para D=0.60 m 88
Tabla 31. Eficiencia de grupos CU_3x3 para D=0.80 m 89
Tabla 32. Carga última (KN) de P-5, P-4, P-9 y de CU_3x3 para D=0.80 m 90
Tabla 33. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.40m 91
Tabla 34. Carga última (KN) de P-2, P-7 y de CIR_8P para D=0.40m..... 92
Tabla 35. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.60 m 93
Tabla 36. Carga última (KN) de P-2, P-7 y de CIR_8P para D=0.60m..... 94
Tabla 37. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.60 m 95
Tabla 38. Carga última (KN) de P-2, P-7 y de CIR_8P para D=0.80 m..... 96
Tabla 39. Carga última (KN) de P-5, P-2, P-8 y de CIR_9P para D=0.40 m 98
Tabla 40. Eficiencia de grupos CIR_9P para D=0.40 m..... 98
Tabla 41. Eficiencia de grupos CIR_9P para D=0.60 m..... 99
Tabla 42. Carga última (KN) de P-5, P-2, P-8 y de CIR_9P para D=0.60 m 100

Tabla 43. Eficiencia de grupos CIR_9P para D=0.80 m 101
Tabla 44. Carga última (KN) de P-5, P-2, P-8 y de CIR_9P para D=0.80 m 102
Tabla 45. Desplazamiento lateral (mm) de pilotes individuales..... 104
Tabla 46. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m 108
Tabla 47. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m 109
Tabla 48. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m 111
Tabla 49. Desplazamiento lateral (mm) De P-4, P-8 y RE_3x3 para D=0.40 m 112
Tabla 50. Desplazamiento lateral (mm) De P-4, P-8 y RE_3x3 para D=0.60 m 114
Tabla 51. Desplazamiento lateral (mm) De P-4, P-8 y RE_3x3 para D=0.80 m 115
Tabla 52. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-4, P-9 y CU_3x3 para D=0.40 m 117
Tabla 53. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-4, P-9 y CU_3x3 para D=0.60m 119
Tabla 54. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-4, P-9 y CU_3x3 para D=0.80 m 121
Tabla 55. Desplazamiento lateral (mm) De P-2, P-7 y CIR_8P para D=0.40 m 123
Tabla 56. Desplazamiento lateral (mm) De P-2, P-7 y CIR_8P para D=0.60 m 124
Tabla 57. Desplazamiento lateral (mm) De P-2, P-7 y CIR_8P para D=0.80 m 126
Tabla 58. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-2, P-8 y CU_9P para D=0.40 m..... 128
Tabla 59. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-2, P-8 y CU_9P para D=0.60 m..... 130
Tabla 60. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-2, P-8 y CU_9P para D=0.40 m..... 132
Tabla 61. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m 134
Tabla 62. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m 134
Tabla 63. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m 134
Tabla 64. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m 138
Tabla 65. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m 138
Tabla 66. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m 138
Tabla 67. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m 142
Tabla 68. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m 142
Tabla 69. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m 142
Tabla 70. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m 144
Tabla 71. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m 144
Tabla 72. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m 144
Tabla 73. Datos estadísticos de módulo de reacción de los suelos 169

Lista de gráficas

Gráfica 1. Variación de parámetros del perfil geotécnico promedio con profundidad..... 53
Gráfica 2. Curvas de carga-desplazamiento de pilotes aislados de pruebas en campo .. 69
Gráfica 3. Curvas de carga-desplazamiento de pilotes aislados en Midas GTS NX 69
Gráfica 4. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_2x2_D40_L25 75
Gráfica 5. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_2x2_D60_L25 77
Gráfica 6. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_2x2_D80_L30 79
Gráfica 7. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_3x3_D40_L25 81
Gráfica 8. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_3x3_D60_L35 83
Gráfica 9. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_3x3_D80_L45 85
Gráfica 10. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CU_3x3_D40_L25 87
Gráfica 11. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CU_3x3_D60_L35 89
Gráfica 12. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CU_3x3_D80_L45 91
Gráfica 13. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_8P_D40_L25 93

Gráfica 14. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_8P_D60_L35 95
Gráfica 15. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_8P_D80_L45 97
Gráfica 16. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_9P_D40_L25 99
Gráfica 17. Curvas de cargas Vs desp. Vert. de CIR_9P_D60_L35 101
Gráfica 18. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_9P_D80_L45 103
Gráfica 19. Curvas de desp. lat. Vs prof. de pilotes de L=25m 104
Gráfica 20. Curvas de desp. lat. Vs prof. de pilotes de L=35m 105
Gráfica 21. Curvas de desp. lat. Vs prof. de pilotes de L=45m 105
Gráfica 22. Curvas de momento flector. Vs prof. de pilotes de L=25m 106
Gráfica 23. Curvas de momento flector. Vs prof. de pilotes de L=25m 106
Gráfica 24. Curvas de momento flector. Vs prof. de pilotes de L=45m 107
Gráfica 25. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-1 de RE_2x2_D40_L45..... 108
Gráfica 26. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L45..... 109
Gráfica 27. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-1 de RE_2x2_D60_L25..... 110
Gráfica 28. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L25..... 110
Gráfica 29. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-1 de RE_2x2_D80_L35..... 111
Gráfica 30. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L35..... 112
Gráfica 31. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_3x3_D40_L25..... 113
Gráfica 32. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 de RE_3x3_D40_L25..... 113
Gráfica 33. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_3x3_D60_L35..... 114
Gráfica 34. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 de RE_3x3_D60_L35..... 115
Gráfica 35. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_3x3_D80_L45..... 116
Gráfica 36. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 de RE_3x3_D80_L45..... 116
Gráfica 37. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CU_3x3_D40_L25 118
Gráfica 38. Curvas de momento flector Vs prof. de P-9 de CU_3x3_D40_L25..... 118
Gráfica 39. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CU_3x3_D60_L35 120
Gráfica 40. Curvas de momento flector Vs prof. de P-9 de CU_3x3_D60_L35..... 120
Gráfica 41. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CU_3x3_D80_L45 122
Gráfica 42. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de CU_3x3_D80_L45..... 122
Gráfica 43. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-2 de CIR_8P_D40_L25..... 123
Gráfica 44. Curvas de momento flector Vs prof. de P-7 CIR_8P_D40_L25..... 124
Gráfica 45. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-2 de CIR_8P_D60_L35..... 125
Gráfica 46. Curvas de momento flector Vs prof. de P-7 CIR_8P_D60_L35..... 125
Gráfica 47. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-2 de CIR_8P_D80_L45..... 126
Gráfica 48. Curvas de momento flector Vs prof. de P-7 CIR_8P_D80_L45..... 127
Gráfica 49. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CIR_9P_D40_L25..... 128
Gráfica 50. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 CIR_9P_D40_L25..... 129
Gráfica 51. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CIR_9P_D60_L35..... 130
Gráfica 52. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 CIR_9P_D60_L35..... 131
Gráfica 53. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CIR_9P_D80_L45..... 132
Gráfica 54. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 CIR_9P_D80_L45..... 133
Gráfica 55. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25..... 134
Gráfica 56. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35..... 135
Gráfica 57. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L45..... 135
Gráfica 58. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L25 136
Gráfica 59. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L35 136
Gráfica 60. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L45 137
Gráfica 61. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25..... 138
Gráfica 62. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35..... 139

Gráfica 63. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35..... 139
Gráfica 64. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L25 140
Gráfica 65. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L35 140
Gráfica 66. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L45 141
Gráfica 67. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25..... 142
Gráfica 68. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35..... 143
Gráfica 69. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L45..... 143
Gráfica 70. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25..... 145
Gráfica 71. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35..... 145
Gráfica 72. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L45..... 146
Gráfica 73. Eficiencia de grupos de pilotes para diferentes configuraciones con S=4D y L=25m 147
Gráfica 74. Eficiencia de grupos de pilotes para diferentes configuraciones con D=0.60m y L=40m 148
Gráfica 75. Eficiencia de RE_2x2_S3D para diámetros de pilotes 148
Gráfica 76. Eficiencia de RE_3x3_S4D para diámetros de pilotes 149
Gráfica 77. Eficiencia de CIR_8P_S5D para diámetros de pilotes..... 149
Gráfica 78. Eficiencia de RE_2x2_L25 para las separaciones de pilotes 150
Gráfica 79. Eficiencia de CU_3x3_L35 para separaciones de pilotes..... 150
Gráfica 80. Eficiencia de CIR_9P_L45 para separaciones de pilotes 151
Gráfica 81. Eficiencia de RE_2x2_D40 para longitudes de pilotes 151
Gráfica 82. Eficiencia de RE_3x3_D60 para longitudes de pilotes 152
Gráfica 83. Eficiencia de CIR_8P_D80 para longitudes de pilotes 152
Gráfica 84. Asentamiento promedio (Uz/D) para las configuraciones con S=4D y L=25m 153
Gráfica 85. Asentamiento promedio (Uz/D) para las configuraciones con D=0.60 y L=40m 153
Gráfica 86. Asentamiento promedio (Uz/D) de RE_2x2_S3D para diámetros de pilotes 154
Gráfica 87. Asentamiento promedio (Uz/D) de CIR_8P_S4D para diámetros de pilotes 154
Gráfica 88. Asentamiento promedio (Uz/D) de CU_3x3_L35 para separaciones de pilotes 155
Gráfica 89. Asentamiento promedio (Uz/D) de CIR_9P_L45 para separaciones de pilotes 155
Gráfica 90. Asentamiento promedio (Uz/D) de RE_3x3_D60 para longitudes de pilotes 156
Gráfica 91. Asentamiento promedio (Uz/D) de CIR_8P_D80 para longitudes de pilotes 157
Gráfica 92. Asentamiento promedio (Uz/L) de RE_3x3_D60 para longitudes de pilotes 157
Gráfica 93. Asentamiento promedio (Uz/L) de CIR_8P_D80 para longitudes de pilotes 158
Gráfica 94. Desp. lat. para diferentes configuraciones de grupos con S=3D y L=25m .. 158
Gráfica 95. Desp. lat. para diferentes configuraciones de grupos con D=0.60m y L=35m 159
Gráfica 96. Desp. Lat. de RE_2x2_S4D_L45 para diferentes estados de cargas..... 159
Gráfica 97. Desp. Lat. promedio de CU_3x3_L25 para diámetros de pilotes 160
Gráfica 98. Desp. Lat. promedio de CIR_9P_L35 para diámetros de pilotes..... 161
Gráfica 99. Desp. Lat. promedio de RE_2x2_L35 para diámetros de pilotes..... 161
Gráfica 100. Desp. Lat. promedio de RE_3x3_L25 para separaciones de pilotes 162
Gráfica 101. Desp. Lat. promedio de CIR_8P_L35 para separaciones de pilotes 162
Gráfica 102. Desp. Lat. promedio de RE_2x2_L45 para separaciones de pilotes 163
Gráfica 103. Desp. Lat. promedio de CU_3x3_D40 para longitudes de pilotes 164
Gráfica 104. Desp. Lat. promedio de CIR_9P_D60 para longitudes de pilotes..... 164

Gráfica 105. Desp. Lat. promedio de RE_2x2_S4D para longitudes de pilotes 165
Gráfica 106. Esfuerzo de flexión de RE_2x2_L25 para diámetros de pilotes 165
Gráfica 107. Esfuerzo de flexión de RE_3x3_S3D para diámetros de pilotes 166
Gráfica 108. Esfuerzo de flexión de CU_3x3_L35 para separaciones de pilotes..... 166
Gráfica 109. Esfuerzo de flexión de CIR_9P_D60 para separaciones de pilotes..... 167
Gráfica 110. Esfuerzo de flexión de RE_3x3_D80 para longitudes de pilotes 168
Gráfica 111. Esfuerzo de flexión de CIR_8P_S5D para longitudes de pilotes 168
Gráfica 112. Variación de módulo de reacción de los suelos con profundidad 169

RESUMEN

Este documento presenta la respuesta mecánica de grupos de pilotes en un perfil geotécnico promedio representativo de los suelos arcillosos de las sábanas de Bogotá. Los análisis de interacción suelo-estructura se realizaron mediante el método de elementos finitos en el programa Midas GTS NX, recurso informático adquirido recientemente por el Grupo de Investigación en Atención y Prevención de Desastres, Riesgos y Resiliencia (GIDPAD) al interior del cual se realizó este trabajo.

Para las simulaciones numéricas de los grupos de pilotes, se utilizaron los siguientes parámetros: configuraciones de grupos, separaciones entre pilotes, diámetros y longitudes de pilotes. El perfil estratigráfico utilizado para las simulaciones fue determinado empleando información de ensayos de campo y laboratorio proveniente de más de cien estudios geotécnicos, incluyendo ensayos in-situ como el ensayos de penetración estándar (SPT) y el piezocono (CPTU), realizados para la Primera Línea del Metro de Bogotá y para otros proyectos de inversión pública y privada a partir de los cuales se consolidó una base de datos de parámetros geomecánicos para los suelos arcillosos del depósito lacustre de la ciudad. En los análisis, los grupos de pilotes fueron sometidos a cargas gravitacionales, laterales y, en algunos casos, a la combinación de ambas. Entre los estados de cargas y los parámetros de estudios se generaron 567 combinaciones

Los resultados de este trabajo son, por una parte, la eficiencia de los grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales, las deformaciones y los momentos flectores en los pilotes obtenidos a partir de los análisis de métodos de elementos finitos. Luego, se presentan resultados de influencia de los parámetros en los resultados de eficiencia, deformaciones y esfuerzos de los grupos de pilotes.

PALABRAS CLAVE

Grupos de pilotes; Respuesta mecánica; Suelos blandos; Suelos lacustres; Pruebas de carga; Simulación numérica, Elemento finito; Eficiencia.

ABSTRACT

This paper presents the mechanical response of pile groups in a representative average geotechnical profile of the clayey soils of the Bogotá savannahs. The structure-soil interaction analyzes were performed using 3D finite element method in the Midas GTS NX software, a computer resource recently acquired by the Research Group on Disaster Attention and Prevention, Risks and Resilience (GIDPAD), within which this work was carried out.

For the numerical simulations of the pile groups, the following parameters were used: group configurations, pile spacings, pile diameters and pile lengths. The stratigraphic profile used for the simulations was determined using information from field and laboratory tests from more than one hundred geotechnical studies, including in-situ tests such as the standard penetration test (SPT) and the piezocone (CPTU), carried out for the First Line of the Bogotá Metro and for other public and private investment projects, from which a database of geomechanical parameters for the clayey soils of the city's lake deposit was consolidated. In the analyses, the pile groups were subjected to gravity loads, lateral loads and, in some cases, to a combination of both. Between the load states and the study parameters, 567 combinations were generated.

The results of this work are, on the one hand, the efficiency of pile groups under gravity loads, deformations and bending moments in piles obtained from finite element method analysis. Then, results of influence of the parameters on the results of efficiency, deformations and stresses of pile groups are presented.

KEYWORDS

Pile groups; Mechanical response; Soft soils; Lacustrine soils; Load tests; Numerical simulation, Finite element; Efficiency.

INTRODUCCIÓN

El uso de las cimentaciones a base de pilotes ha crecido cada día debido a su gran aporte a la realización de complejas edificaciones como puentes, edificios, torres, tanques y estructuras en aguas costeras. Su uso ha permitido grandes innovaciones, caminos hacia el progreso y avances tecnológicos del sector de construcción en la época actual. La aplicación de las cimentaciones profundas, como es el caso de pilotes, fustes perforadas y campanas neumáticas, han sido consideradas cuando: las cimentaciones poco profundas sean inadecuadas y las cargas estructurales necesiten ser transmitidas a suelo o roca más profundos y más apropiados; las cargas ejercen fuerzas de levantamiento o laterales sobre las cimentaciones; se requiere que las estructuras sean soportadas sobre agua; la funcionalidad de la estructura no permite asentamientos diferenciales; o se esperan futuras excavaciones adyacentes (Budhu et al., 2018; Merritt, 2008).

Considerando el rumbo de crecimiento de obras civiles en la Ciudad de Bogotá, en donde una gran parte de estas edificaciones se cimentan sobre las arcillas del depósito lacustre y son suelos arcillosos generalmente blandos. Esto conduce a una gran demanda del uso de cimentaciones profundas a base de pilotes en la construcción, sobre todo, para satisfacer las solicitaciones que implican las edificaciones de gran envergadura y puentes para infraestructura vial urbana que se construyen el día de hoy en Bogotá.

Es importante resaltar que la ejecución de estos sistemas de cimentaciones en suelos de alta compresibilidad y de baja capacidad, como los suelos lacustres de Bogotá, requiere análisis y diseño geotécnico bien detallado para llegar a garantizar la estabilidad de las estructuras y evitar el exceso de asentamiento en éstas. Particularmente, en Bogotá, la presencia de una capa sobreconsolidada de hasta 10m de espesor desde la superficie genera inquietud en la respuesta mecánica de pilotes, motivo por el cual este trabajo pretende profundizar en este aspecto a partir de simulaciones numéricas tridimensionales. En el caso contrario, las construcciones pueden llegar a tener asentamientos que rebasan los límites permitidos por las normas de construcciones locales y además generan daños en las estructuras sobre todo cuando los asentamientos en cuestión son diferenciales.

Frente a esta coyuntura, este trabajo presenta la respuesta mecánica de grupos de pilotes analizados en un perfil geotécnico promedio representativo de los suelos arcillosos del depósito lacustre de Bogotá mediante el método de elementos finitos en 3 dimensiones en el programa Midas GTS NX. En la modelación de los grupos de pilotes se utilizaron configuración de grupo, separaciones entre pilotes, diámetros y longitudes de pilotes como parámetros de estudio.

A partir de los resultados obtenidos por los análisis del método de elementos finitos en 3 dimensiones realizados, se presentan la eficiencia de los grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales, deformaciones de los sistemas y esfuerzos internos de los pilotes debido a las cargas laterales.

El contenido de este trabajo se reparte por los siguientes:

En el capítulo 1, problema de investigación, se presentan los antecedentes y contexto del problema, el planteamiento del problema de investigación y la justificación del trabajo.

En el capítulo 2, se incluye el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo de investigación.

En el capítulo 3, se presenta el estado de arte y el marco teórico.

En el capítulo 4, la metodología, se presentan la caracterización de los suelos arcillosos de la sabana de Bogotá, las cargas aplicadas a los pilotes en los modelos de simulación y la modelación numérica.

En el capítulo 5, se presentan los resultados de eficiencia y desplazamiento vertical de los grupos de pilotes sometidos a cargas gravitacionales, los resultados de momentos de flector interno de los pilotes y desplazamiento lateral promedio de los grupos de pilotes sometidos a cargas laterales y a combinaciones de cargas, y análisis de los resultados de las simulaciones.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN / OBJETO DE ESTUDIO

1.1 ANTECEDENTES Y CONTEXTO DEL PROBLEMA

Más de 60% del área urbana de la ciudad de Bogotá se encuentra en los depósitos lacustres (Caicedo et al., 2018). Estos depósitos están constituidos por una secuencia de arcillas plásticas de color gris oscuro, en niveles de 0,4 m a 1,0 m de espesor, con intercalaciones de lentes de arena y grava e intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blancuzco, las cuales son más abundantes hacia la parte media del depósito. Hacia las márgenes, se presentan arcillas orgánicas, arcillas arenosas y turba-lignito (SYSTRA & INGETEC, 2018)

Los depósitos lacustres o la sabana de Bogotá se formaron a partir de la acumulación de sedimentos finos en un antiguo lago con fluctuaciones en el nivel de agua principalmente arcillas lacustres, y hacia los bordes de esta cuenca sedimentaria arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas (SYSTRA & INGETEC, 2018). Los depósitos tienen profundidad que va de 20 metros hasta 586 metros y su comportamiento geotécnico, en general, es suelos de baja a media capacidad portante y muy compresibles (Caicedo et al., 2018; Puerto et al., 2010).

Caicedo et al. (2019), en su investigación, encontraron que los suelos superficiales de 5 a 10 m de profundidad de los depósitos lacustres están sobreconsolidados y a partir de sondeos determinaron los valores promedio para las siguientes propiedades geotécnicas: límite de líquido, contenido de agua, límite de plástico, índice de consistencia y cohesión sin drenaje en diferentes capas hasta una profundidad de 50 m y así se presenta, en la Figura 1, un perfil típico de sabana de Bogotá. Los rangos de desviación estándar de las propiedades geotécnicas mencionados anteriores fueron tan altos como 12% a 99% para el límite líquido, 2% a 33% para el límite plástico, 14% a 97% para el contenido de agua y 4 a 46 kPa para la cohesión como se muestra en diferentes profundidades. Además, se observaron que la alta variación de los índices mencionados anteriormente se debió a los procesos geológicos que llenaban el lago que forman los suelos lacustres de Bogotá.

En el noroccidente del depósito lacustre, se encontraron que la relación de sobreconsolidación y el coeficiente de presión de tierras en reposo, Ko, se varía entre 0.95 y 1.21 en los primeros 6 metros de profundidad debido a la influencia de la presión negativa de agua causada por la desecación que se ha manifestado en la configuración de los máximos esfuerzos efectivos soportados por el esqueleto mineral del material sobre planos verticales y horizontales, lo que origina valores de los esfuerzos de preconsolidación similares en las direcciones perpendiculares entre sí (Pineda-jaimes & Colmenares, 2015). Del mismo estudio, para profundidades mayores a 6 metros, los valores de Ko oscilan entre 0.27 y 0.98 dado que los materiales arcillosos, en el perfil estudiado, se han identificado como fuertemente sobreconsolidados cerca de la superficie del terreno y normalmente consolidados en profundidad.

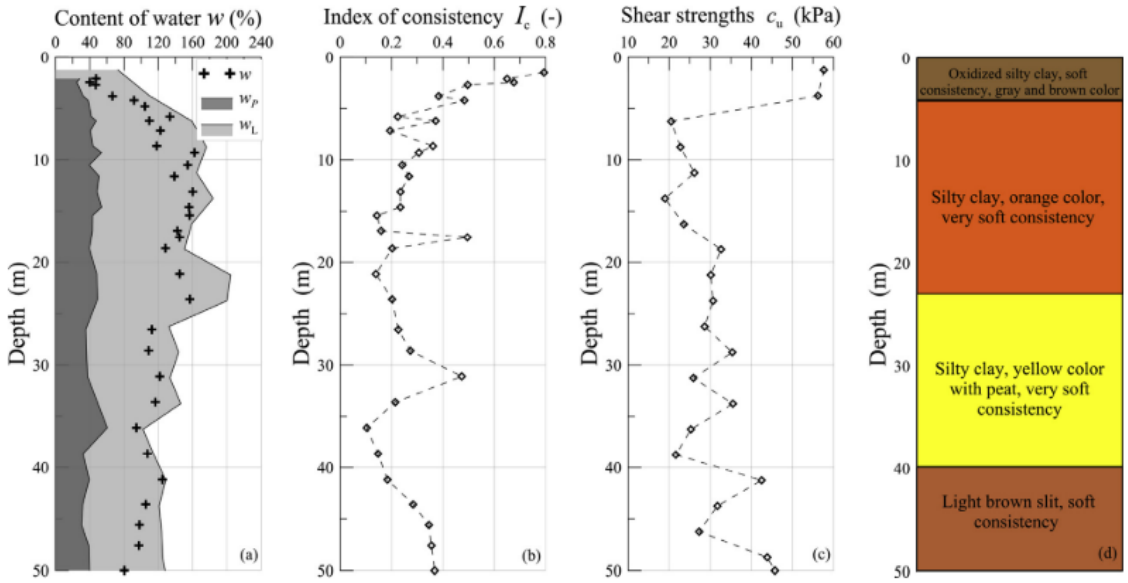


Figura 1. Comparación entre (a) Límite plástico, Límite líquido, y Contenido de agua; (b) Índice de consistencia; Cohesión sin drenaje; and (d) Estratigrafía.
Fuente: (Caicedo et al., 2019)

Con respecto a las propiedades de los suelos lacustres de Bogotá donde la capa de los 10 primeros metros de profundidad está sobreconsilidada por desecación y fluctuaciones del nivel freático, las estructuras geotécnicas deben lidiar con un suelo con baja capacidad de carga y asentamientos excesivos. Por tal motivo, en algunos casos, para los grandes proyectos de construcción se han empleado, como solución apropiada, cimentaciones de placa-pilotes. (Durán G., 2003), se describieron criterios y metodología en el estudio de interacción placa-pilotes-suelo para encontrar racionalmente, por aproximaciones sucesivas, la capacidad utilizada de los pilotes, la repartición de la carga del edificio entre la placa y los pilotes, el factor de seguridad de la cimentación, y los asentamientos resultantes que, a su vez, expliquen y sean compatibles con las transferencias de carga encontradas, tanto para el corto como para el largo plazo en perfiles de suelos blandos del depósito lacustre de Bogotá.

Durán G. (2003) después de analizar varios esquemas de placa-pilotes, cimentación de placa y cimentación profunda con pilotes largos de fricción para un proyecto en los suelos lacustres de Bogotá, concluyeron que: el sistema de cimentación placa-pilotes genera un mayor grado de seguridad contra la falla por capacidad portante y reduce los asentamientos, principalmente, los asentamientos por consolidación, respecto a la solución de la cimentación de losa corrida; la longitud y la cantidad adecuadas de los pilotes para completar el trabajo de la placa dependen de la presión de preconsolidación, de la relación de sobreconsolidación, de la variación de la resistencia y de la compresibilidad del suelo con la profundidad, también están en función de la capacidad última individual de los pilotes y el grado de compensación del peso del edificio; los sistemas placa-pilotes proporcionan una mejor solución que la cimentación de placa corrida sin pilotes o que los pilotes largos de fricción para sobrellevar de forma satisfactoria los procesos tardíos de compresión secundaria y los procesos de subsidencia regional por descenso continuado del nivel freático. Además, se recomendaron que respalden con más resultados de pruebas de carga

de pilotes y con el monitoreo de otros casos reales para la aplicación del sistema placa-pilotes en los suelos lacustres de Bogotá.

A nivel mundial, el comportamiento mecánico de los suelos arcillosos y los suelos blandos específicos han sido ampliamente estudiados. Estas investigaciones principalmente se centran en suelos ubicados en Londres, ciudades de Canadá, Tokio, Ciudad de México, Boston y Bangkok, entre otros. Las soluciones para trabajos geotécnicos colocados en estos suelos se extrapolan a suelos en otras partes del mundo. Estos suelos tienen propiedades contraintuitivas para la mayoría de los suelos en el mundo, por ejemplo, altos índices de plasticidad y altos ángulos de fricción (Caicedo et al., 2019).

La estimación de la eficiencia de grupos de pilotes en los suelos de baja capacidad siempre ha sido compleja en los estudios geotécnicos. Existen varios métodos empíricos para determinar la eficiencia de grupos de pilotes en suelos arcillosos y arenosos como las ecuaciones de Converse-Labarre, los Ángeles, Seiler-Keeney entre otros (BRAJA M, 2011). El límite de esas ecuaciones, es que solo consideran el espaciamiento entre los pilotes, la configuración geométrica y el número de pilotes que contienen los grupos. Trabajo de investigación de modelación numérica de grupos de pilotes en suelos arcillosos de Rose et al. (2013) muestra que la eficiencia de un grupo de pilotes cambia en un perfil de suelo a otro. Yudiawati et al. (2019) en su trabajo, capacidad de soporte y eficiencia de grupos de pilotes de fricción en suelo muy blando, encontraron que la eficiencia de los grupos de pilotes se varía en función de la longitud de los pilotes.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN U OBJETO DE ESTUDIO

El proyecto está enfocado en el análisis de respuesta mecánica de grupos de pilotes en los suelos lacustres de Bogotá, y en presentar una alternativa en los parámetros utilizados en las cimentaciones profundas a base de pilotes para generar sistemas de cimentación más eficaz, estable y económica en dichos suelos. El proyecto está enmarcado dentro de la modelación y simulación de problemas geotécnicos de estabilidad y deformación.

De acuerdo con las estadísticas consultadas en el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) sobre licencias de construcciones aprobadas en Bogotá, hay en promedio, 3,085,932 metros cuadrados de construcciones aprobadas anualmente en la última década (*Secretaría Distrital de Planeación*, n.d.). El crecimiento de construcción se debe a que en los últimos años se ha presentada un aumento en la población en la zona metropolitana, situación que ha conducido a que los diseños de los proyectos sean más verticales. De esta manera a más altura son mayores las cargas que deben soportar las cimentaciones.

Las empresas de construcciones y los ingenieros geotécnicos han adoptado cimentaciones profundas a base de pilotes para evitar grandes hundimientos y exceso de asentamientos diferenciales y garantizar la estabilidad de las estructuras que se encuentran en los suelos cohesivos de Bogotá, los cuales, cuyas propiedades geotécnicas que los conducen a suelos de baja capacidad y de alta compresibilidad. Para un mejor entendimiento de respuestas mecánicas y una mejor aplicación de los sistemas de cimentación a base de pilotes en los

suelos de la sabana de Bogotá, los análisis de método de elementos finitos en 3 dimensiones son fundamentales para lograr una mejor predicción del comportamiento mecánico de grupos de pilotes que favorecen a la estabilidad y sustentabilidad de esta clase de sistemas geotécnicos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El crecimiento de la ciudad de Bogotá ha exigido un gran número de proyectos de construcción, sobre todo construcciones verticales que transmiten muchas cargas a los suelos. Cuando esas construcciones se cimientan sobre los suelos blandos del depósito lacustre de la ciudad, suelos cuya baja resistencia alta compresibilidad, genera un desafío en el análisis y diseño geotécnico de las cimentaciones para poder garantizar la estabilidad de las superestructuras y las excavaciones (E. E. Rodríguez et al., 2016). Para el diseño de sistemas óptimos de cimientos se requiere una caracterización geotécnica redundante para lograr parámetros confiables de resistencia y deformabilidad, donde las pruebas de campo como prueba de penetración de cono, prueba de dilatómetro y prueba de cizallamiento de paletas son indispensable. Además, la complementariedad y la correlación con las pruebas de laboratorio para determinar la variación y mejorar la confiabilidad de los parámetros de los suelos, y eso se usa en el análisis geotécnico y el análisis de la interacción suelo-estructura de dos o tres dimensiones.

Comúnmente en los suelos blandos, para los proyectos de construcción que transmiten grandes cargas a la base se han adoptado cimentaciones profundas como base de pilotes. En algunos países, para llevar a cabo estos tipos de sistemas geotécnicos en estas condiciones, han realizado investigaciones de geotecnias basados en estudios analíticos, numéricos y entre otros para poder generar un cierto de grado de certeza de estabilidad de la base para la superestructura como el trabajo de Ruge Cárdenas et al. (2014) en Brasil, el trabajo de Rodríguez Rebolledo & Auvinet Guichard (2019) en la arcilla de la Ciudad de México, el trabajo de Abdel-Azim et al. (2020) en Alemania y entre otros.

Aunque existen estudios de simulación numérica de sistema placa pilote y de grupos de pilotes con parámetros de perfil de suelos blandos de diferentes partes del mundo, es necesario realizar estudios con los parámetros típicos de los suelos arcillosos de la sabana de Bogotá con el fin de analizar los resultados de las interacciones de los sistemas de grupos de pilotes con las propiedades geotécnicas de estos suelos. Hoy en día, los modelos numéricos como el método de los elementos finitos ofrecen nuevas posibilidades para el análisis y diseño de cimentaciones sometidas a varias acciones. Estos modelos permiten evaluar de forma detallada la magnitud de los esfuerzos desarrollados en los elementos de la cimentación como los pilotes y las deformaciones consecuentes, aun en suelos heterogéneos.

Debido a todo eso, el estudio de investigación en cuestión se basó en la realización de simulaciones numéricas de grupos de pilotes en los suelos arcillosos de Bogotá donde a partir de ellas se determinaron la influencia de cada parámetro de los grupos de pilotes como diámetro, longitud y distancia entre pilotes, que generan la mejor eficiencia de los grupos de pilotes ante cargas gravitacionales, cargas laterales y la combinación de las dos acciones. Con los parámetros estudiados, se podrán realizar mejor diseño de

cimentaciones profundas a base de grupos de pilotes y así generar construcciones más estables, sustentables y económicas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia de grupos de pilotes en suelos lacustres de Bogotá

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar un perfil de análisis geotécnico representativo de los suelos arcillosos lacustres de Bogotá
- Modelar la respuesta mecánica de grupos de pilotes sometidos a cargas verticales y cargas horizontales en las arcillas de Bogotá
- Realizar un análisis comparativo de la respuesta de los grupos de pilotes analizados
- Establecer las configuraciones de los grupos de pilotes que resultan tener mejores comportamientos ante las acciones externas.

3. MARCO DE REFERENCIA

Esta sección comprende en una primera parte, el estado del arte en el cual se presenta revisión de artículos nacionales e internacionales relacionados con el presente trabajo. En la segunda parte, se presenta el marco teórico en el cual se define los principales conceptos geotécnicos utilizados en este trabajo.

3.1 ESTADO DEL ARTE

En los siguientes incisos se presentan un estudio de campo realizado en los suelos lacustres de Bogotá y otros estudios de modelos numéricos que se relacionan con el trabajo de investigación. Los segundos son investigaciones de modelos numéricos que se han desarrollado a nivel mundial con el propósito de entender los comportamientos mecánicos de grupos de pilotes que cimentan en suelos blandos y de incrementar la seguridad de las cimentaciones a base de pilotes sometidas a diferentes cargas.

3.1.1 Estudio de campo en los suelos lacustres de Bogotá

J. A. Rodríguez & Velandia, (2009) presentaron resultados de estudios de pruebas de carga dinámica sobre pilotes preexcavados e hincados en los suelos lacustres Bogotá. Los ensayos fueron realizados con el propósito de determinar la capacidad de los diferentes tipos de pilotes para optimizar y aportar información y conocimiento sobre los suelos del área aplicable para obras de construcción.

En la Figura 2, se muestran los resultados de carga y deformación obtenidos de los ensayos para los 4 pilotes preexcavados de diámetro 0.60 m, de longitud variable de 33 m (pilote 1 y 2 este), de 39 m el pilote 3 y de 43 m el pilote 2 oeste. Para los pilotes hincados, los resultados de carga-deformación se ven en la Figura 3, donde se hincaron tres (3) pilotes de sección cuadrada de 0.30 m x 0.30 m, con longitud variable de 39 m pilote 1 y 2, y de 52 m el pilote 3.

En las pruebas dinámicas, se obtuvo la distribución de carga por fricción a lo largo de los pilotes. Se puede ver en la Figura 4, la resistencia unitaria por fricción para los pilotes preexcavados como para los hincados donde se puede observar que la capacidad de resistencia por fricción se aumenta con mayor profundidad.

En ese trabajo se mostraron los comportamientos mecánicos de pilotes individuales preexcavados e hincados obtenidos de las pruebas dinámicas realizadas en los suelos blandos de Bogotá que son los suelos en cuestión del presente trabajo de investigación.

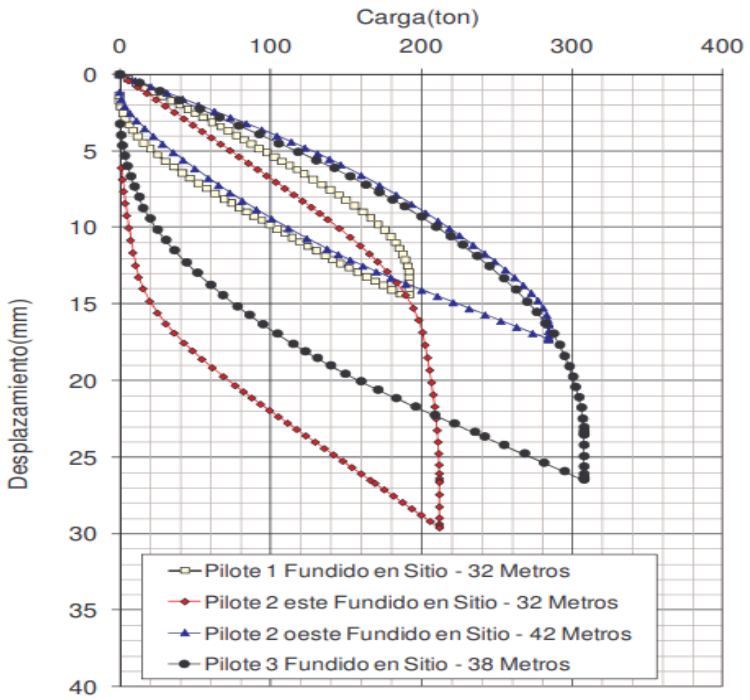


Figura 2. Curvas esfuerzo-desplazamiento para carga estática en pilotes pre-excavados obtenidas a partir de los ensayos.
Fuente: (J. A. Rodríguez & Velandia, 2009)

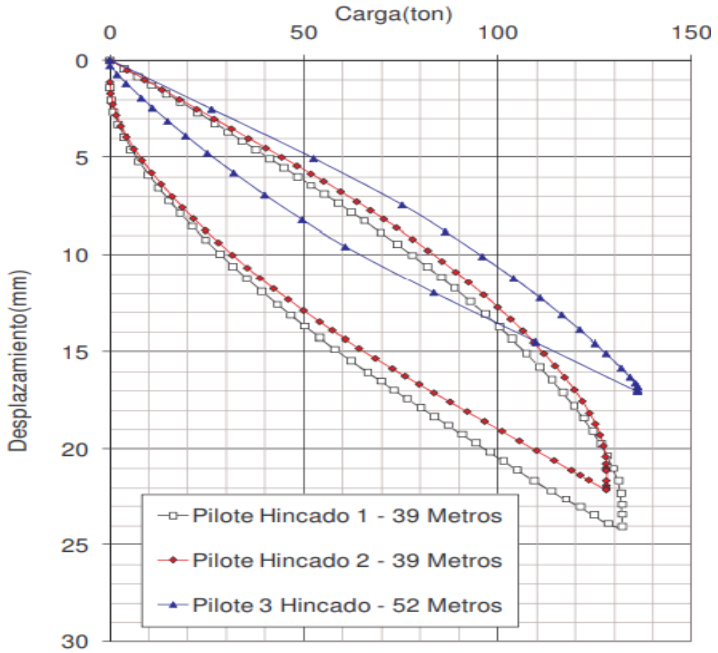


Figura 3. Curvas esfuerzo-desplazamiento para carga estática en pilotes hincados obtenidas a partir de los ensayos.
Fuente: (J. A. Rodríguez & Velandia, 2009)

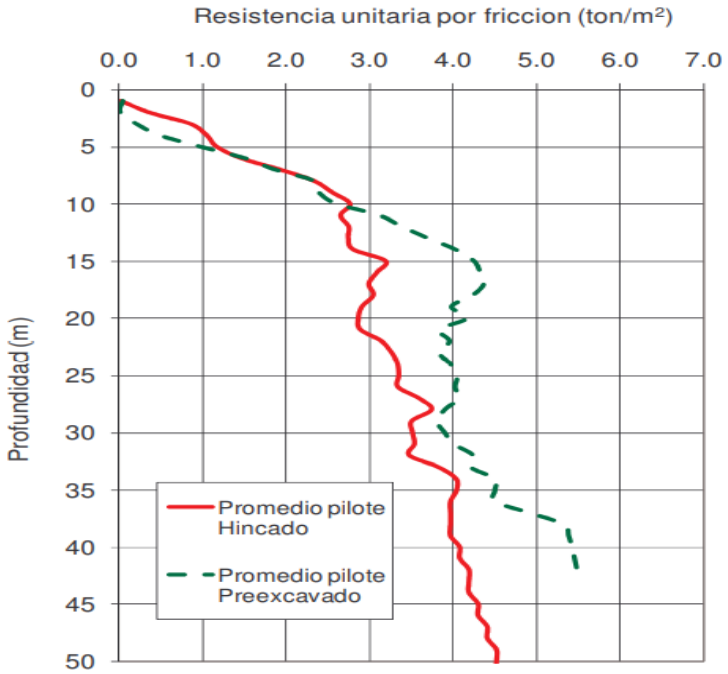


Figura 4. Capacidad ultima de pilotes obtenidas en las pruebas de carga.
Fuente: (J. A. Rodríguez & Velandia, 2009)

3.1.2 Investigaciones de modelos numéricos

Al-abboodi & Sabbagh (2019), se presentaron los resultados de un estudio de modelado numérico de grupos de pilotes a pequeña escala con el propósito de investigar las influencias del diámetro, de la rigidez relativa del pilote y del suelo, y la configuración del grupo en el comportamiento mecánico de los grupos de pilotes sometidos a movimientos uniformes del suelo de un desplazamiento lateral de Δ_B=30 mm.

Como parte de los resultados, en la Figura 5 se muestran los momentos y desplazamientos de los pilotes con diferentes diámetros (D=10, 15, 20 y 30 mm). Evidenciaron que, con un mayor diámetro, los pilotes pueden resistir a mayor momento y disminuir los desplazamientos laterales del sistema. Referente al efecto de relación relativa del pilote y del suelo, ver Figura 6, se hicieron una comparación de dos valores (Kr=0.02 y 0.0004) y observaron que, con el mayor valor de rigidez relativa, los grupos de pilotes son más eficaz. Para el caso de las configuraciones de los grupos de pilotes, una serie de configuración de grupos fueron examinadas, grupos de (2x2), (2x3) y su orientación invertida (3x2), (2x4) y su orientación invertida (4x2). En los resultados se destacaron que la configuración del grupo de (2x2), tiene una mejor eficiencia que las otras configuraciones para resistir a los momentos flectores, aunque su desplazamiento lateral fue superior.

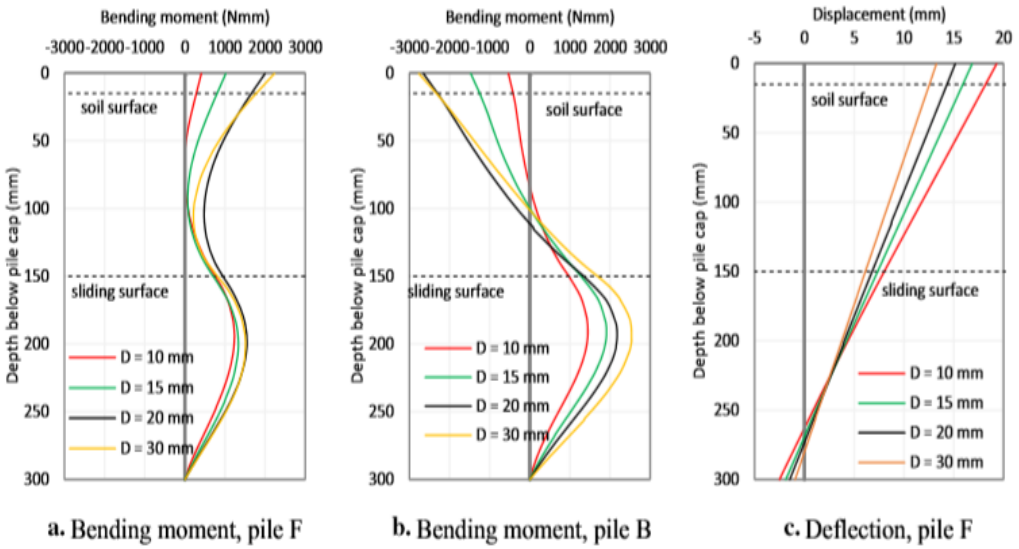


Figura 5. Respuestas de pilotes con diferentes valores de diámetro para Δ_B=30mm
Fuente: (Al-abboodi & Sabbagh, 2019)

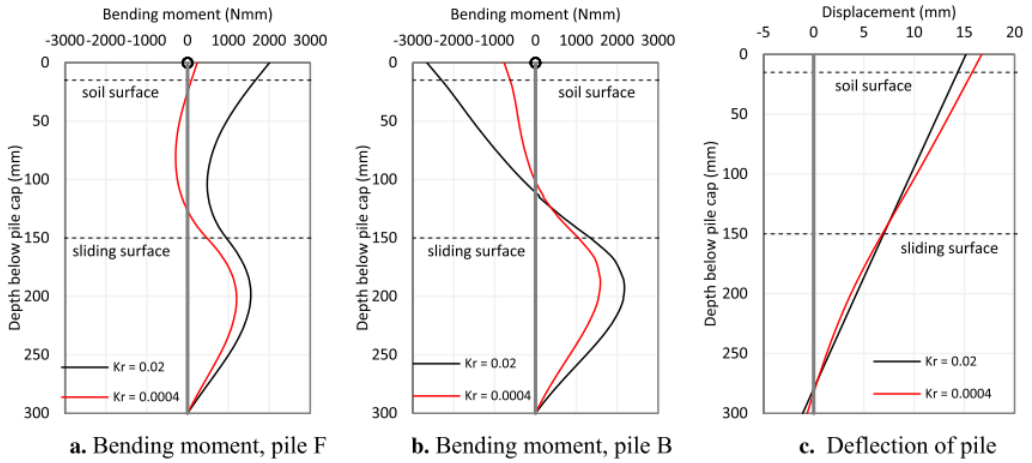


Figura 6. Respuestas de pilotes con diferentes valores de Kr para Δ_B=30 mm
Fuente: (Al-abboodi & Sabbagh, 2019)

El modelado confirmó las influencias que tienen los diámetros de los pilotes, la rigidez relativa y las configuraciones de los grupos de pilotes en el comportamiento del sistema donde estos elementos forman parte del presente trabajo de investigación. En el estudio se mantuvo una sola distancia entre pilotes y una longitud constante de pilote donde estos parámetros podían tener un efecto relevante en el comportamiento de los grupos.

Mali & Singh (2019) realizaron un modelo de elementos finitos 3D para examinar el comportamiento de asentamiento, compartición de carga, momento flector y fuerza cortante de cimentaciones de placa-pilote en diferentes perfiles de suelo arcilloso para diferentes configuraciones de carga y configuraciones de pilotes como se definen en la Figura 7.

Los resultados obtenidos concluyen que, con el aumento de distancia entre pilotes, los grupos tienen una mejor respuesta mecánica para resistir a los momentos flectores y a los

esfuerzos de cortantes, se aumenta el coeficiente de repartimiento de las cargas y se disminuye de manera eficaz el asentamiento general en el sistema. Sin embargo, tiene una tendencia contraria para los asentamientos diferenciales como se puede apreciar en la Figura 8. Además, para las configuraciones de carga, los grupos de pilotes tienen un mejor comportamiento bajo las cargas distribuidas.

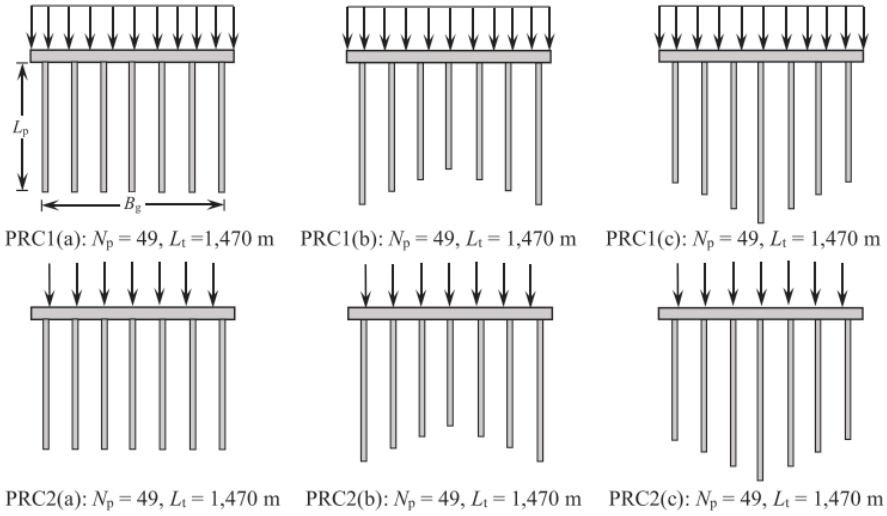


Figura 7. Configuraciones de cargas y de grupos de pilotes
Fuente: (Mali & Singh, 2019)

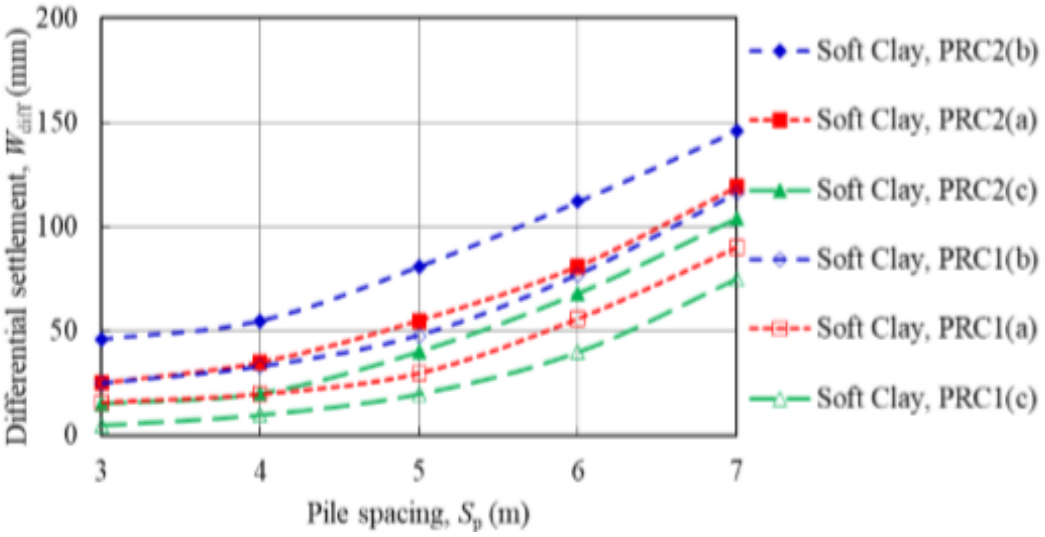


Figura 8. Efecto de espaciamiento de pilotes en el asentamiento diferencial
Fuente: (Mali & Singh, 2019)

En el trabajo se examinaron el efecto de distanciamiento entre pilotes, un punto referente del presente trabajo de investigación, y muestra una gran influencia en el comportamiento de los grupos con el aumento de su valor, pero el hecho de considerar un número constante de pilotes conduce a un aumento del área ocupada por la cimentacion y eso no es tan factible en la cimentacion de placa-pilotes.

Elwakil & Azzam (2016) presentaron resultados de un estudio numérico y experimental, a pequeña escala, de una cimentación de placa pilote incrustada en arena sometidos a cargas gravitacionales. Para el estudio, se consideraron los siguientes parámetros: diferente número de pilote en un grupo, relación de longitud y diámetro de pilote (L/D, espacio entre pilotes (S/D), así como relación de rigidez del pilote y del suelo (Ep/Es).

En la Figura 9 se presentan resultados de comparación del estudio experimental con el numérico donde los dos estudios tienen la misma tendencia. Como se observa en la Figura 10, con el incremento del valor L/D, así como el valor de Ep/Es se reducen automáticamente el asentamiento vertical y se aumenta el porcentaje de carga soportada por los pilotes. Mientras con el aumento de S/D se disminuye el porcentaje carga soportada por los pilotes. Referente al número de pilotes en un grupo, los resultados muestran que, con un número mayor de pilote, el sistema tiene más capacidad de soportar cargas gravitacionales.

En ese estudio se evidenciaron la importancia de diferentes parámetros en el estudio de simulación, también mostraron que al considerar las características del suelo permite determinar el parámetro más adecuado para mejorar el comportamiento de una cimentación de placa pilote. Aunque se evaluaron varios parámetros en ese estudio, los resultados se limitan solo a efecto de asentamiento vertical y al porcentaje de carga soportada por los pilotes.

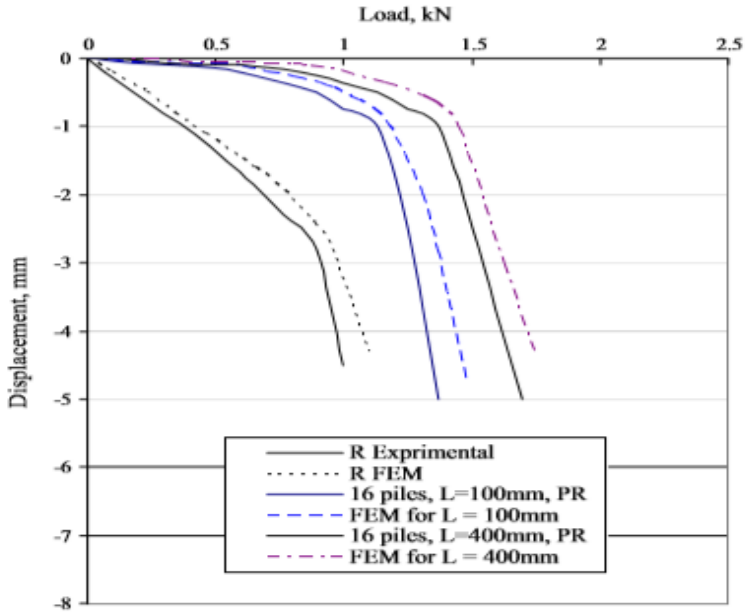


Figura 9. Comparación de resultados experimentales y numéricos para la placa (R) y el sistema de placa pilote (PR)
Fuente: (Elwakil & Azzam, 2016)

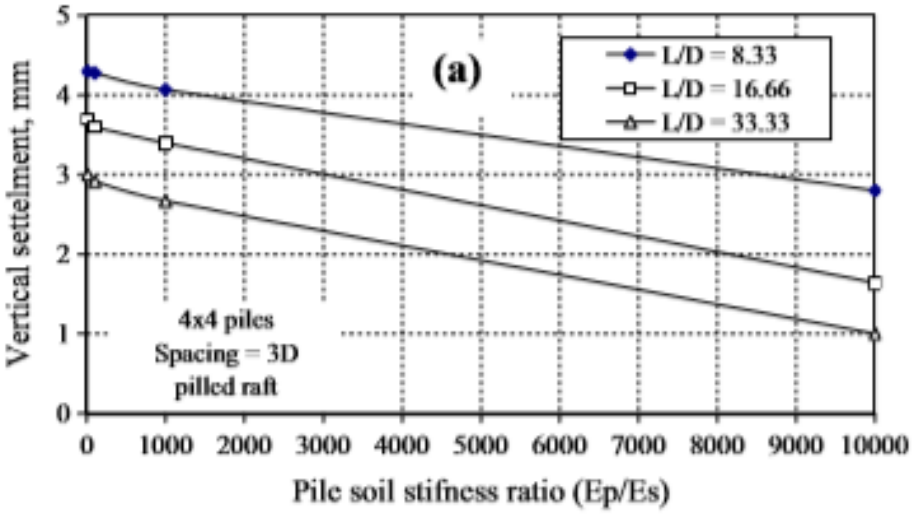


Figura 10. Efecto de Ep/Es en el asentamiento vertical
Fuente: (Elwakil & Azzam, 2016)

Ata et al. (2015), el objetivo principal de su estudio paramétrico es investigar el rendimiento del sistema de placa pilote no conectada de varias geometrías y dimensiones. Los parámetros estudiados incluyeron espesor y propiedades del amortiguamiento, número de pilotes, diámetro y longitud del pilote, así como grosor de la placa para reducir el asentamiento.

De un primer análisis, la Figura 11, muestra una comparación de los asentamientos de la placa, la placa pilote conectada (CPRF) y el sistema de placa pilote no conectado. Donde se puede ver que, en comparación con el caso de una placa sin pilotes, el asentamiento máximo de la placa pilote conectada (CPRF) ha disminuido en un 77 %, mientras en la placa pilote no conectada ha disminuido en un 74 %. Los resultados muestran que, a medida que aumentaron el módulo de elasticidad (de 200 MPa a 34000 MPa) de amortiguación igual que para el aumento del diámetro y el espesor de la placa, se disminuye el asentamiento diferencial significativamente.

En ese trabajo, se mostró que desde un número de 25 a 141 pilotes se disminuye de forma significativa la diferencia de asentamiento en el centro en comparación en el borde del sistema como se muestra en la Figura 12.

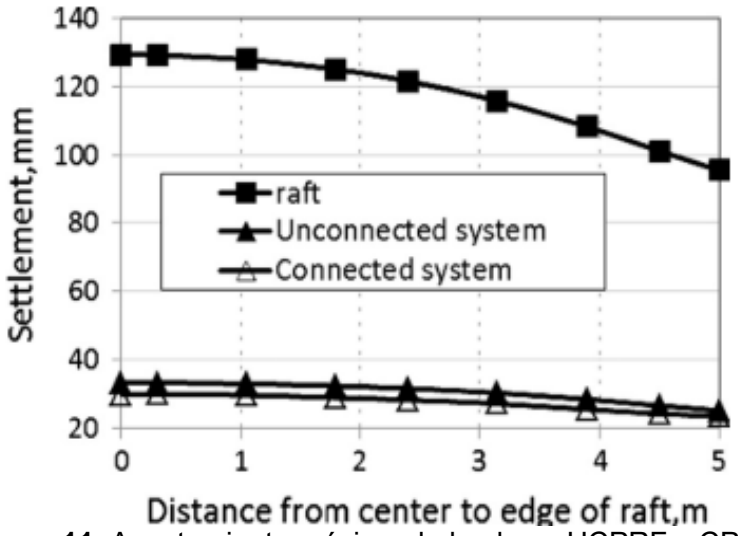


Figura 11. Asentamiento máximo de la placa, UCPRF y CPRF
Fuente: (Ata et al., 2015)

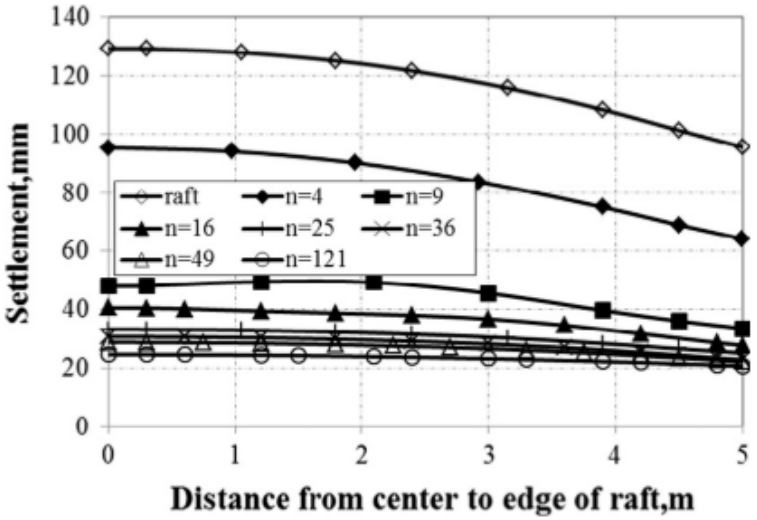


Figura 12. Asentamiento frente a número de pilotes
Fuente: (Ata et al., 2015)

Los resultados del trabajo anterior se enfocaron solamente en el comportamiento del sistema ante asentamientos bajo cargas gravitacionales, no obstante, se muestra la importancia de usar el parámetro de diámetro y número de pilotes en un estudio de simulación de grupos de pilotes.

Rose et al. (2013) presentaron resultados de efectividad relativa de grupos de pilotes por mediante de una simulación numérica. Para la investigación numérica se utilizaron el programa de elementos finitos ABAQUS y se consideraron un rango de variables que afectan el comportamiento del grupo de pilotes, como: número de pilotes, espacio entre pilotes, relación longitud / diámetro y resistencia del suelo. También se evaluaron tres tipos de grupos que son, en primer lugar, grupos perimetrales cuya forma circular o cuadrada

(PC o PS), grupos perimetrales con un pilote en el centro (TC y TS) y por último el grupo de cuadrícula (GS).

Los resultados de grupos circulares (PC o TC) mostraron que tienen una eficiencia ligeramente mayor que los grupos cuadrados (PS o TS) equivalentes, como se muestra en la Figura 13. En la Tabla 1, muestran que con un espacio demasiado pequeño entre pilotes puede disminuir la eficiencia del grupo. Los pilotes con una relación L/d más alta causaron una reducción en el asentamiento del suelo y, en algunos casos, un aumento asociado a la eficiencia del grupo. Referente a los tipos de suelo estudiados, resultados mostraron que un mayor espacio entre pilote conduce al grupo a tener una mejor eficiencia en un suelo de menor capacidad.

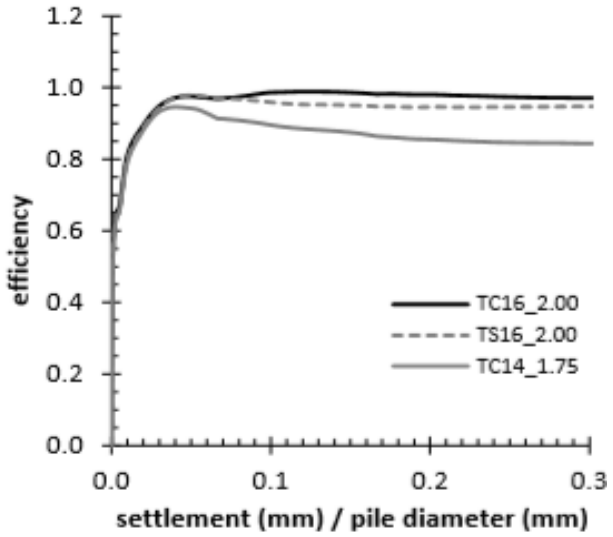


Figura 13. Resultados de grupos perimetrales con un pilote en el centro.
Fuente: (Rose et al., 2013)

Tabla 1. Resultados de eficiencia de grupos de cuadricula.

group	efficiency		
	0.02 d	0.05 d	0.10 d
GS25_1.50 (sp_A)	0.65	0.58	0.54
GS25_2.00 (sp_A)	0.76	0.79	0.71
GS25_3.00 (sp_A)	0.81	0.85	0.83
GS16_2.00 (sp_A)	0.86	0.92	0.82

Fuente: (Rose et al., 2013)

Aunque en el artículo anterior no se presentaron la eficiencia de los grupos de pilotes ante cargas laterales, pero estudiaron muchos parámetros en la simulación de los grupos de pilotes y son muy influentes en la respuesta mecánica de grupos de pilotes. Para el presente estudio, el artículo fue una guía por los parámetros y las características de los suelos presentados que se les relacionan en el estudio de comportamiento mecánico de los grupos de pilotes.

Susila y Anggraini (2016), en su trabajo, se presentaron resultados de estudio de interacción entre pilotes, placa y suelo de un sistema de placa pilote en arcillas medianas y rígidas. Se consideraron los efectos de varias distancias entre pilas (s/d) y número de pilotes (nxn) de una placa de 26x26 m que afectan los mecanismos de transferencia de carga y la deformación. El estudio se realizó utilizando el método de elementos finitos en 3D con el paquete de software profesional Plaxis3D Foundation.

Como parte de los resultados, en la Figura 14, se presentan resultados de cargas-asentamientos donde la capacidad del sistema para soportar cargas verticales se aumenta con la reducción de espacio entre pilotes o con el aumento de numero de pilotes. Además, los resultados mostraron que la reducción del espacio entre pilotes reduce de manera significativa los asentamientos sobre todo los asentamientos diferenciales. No obstante, la reducción del espaciamiento entre los pilotes generó un mayor número de pilotes ya que el área considerada es constante.

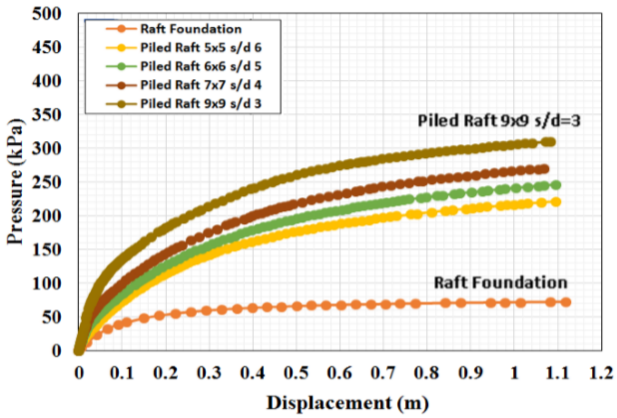


Figura 14. Carga asentamiento del sistema con pilotes de 20m de longitud.
Fuente: (Susila & Anggraini, 2016)

El estudio mostró la influencia que tiene el parámetro de espacio entre pilotes en el comportamiento de un sistema de placa pilote como para la capacidad de carga o para la reducción de asentamientos. El estudio se relaciona con el presente trabajo de investigación por el sistema de cimentación y los parámetros de estudio en la simulación numérica.

Nasrollahi y Seyedi Hosseininia (2019) presentaron resultados de un estudio analítico de una base placa-pilotes cargada verticalmente. Se estudiaron el efecto de parámetros del sistema placa-pilotes para evaluar los asentamientos y las cargas soportadas por los pilotes. Los parámetros considerados en los análisis son el número y la longitud de los pilotes, las dimensiones de la balsa, los parámetros elásticos del suelo y el coeficiente de interacción de rigidez. En este estudio paramétrico, La carga aplicada y los parámetros elásticos de los pilotes, así como de la balsa son constantes.

Como resultados, en un primer lugar, mostraron la influencia significativa de la longitud de los pilotes en la reducción de asentamientos y aumento de capacidad de carga por pilotes al aumentar su longitud (ver Figura 15) ya que la mayor parte de la capacidad portante es proporcionada por la resistencia de fricción. Por otra parte, mostraron que el aumento de

número de pilotes, disminución de distancia entre pilotes, es otra opción efectiva para reducir asentamiento en un sistema placa-pilotes y aumentar el porcentaje de carga soportada por los pilotes como se muestra en la Figura 16. Otro parámetro que conduce a la reducción de asentamiento en el sistema es el aumento del espesor de la placa, que también reduce la carga soportada por los pilotes.

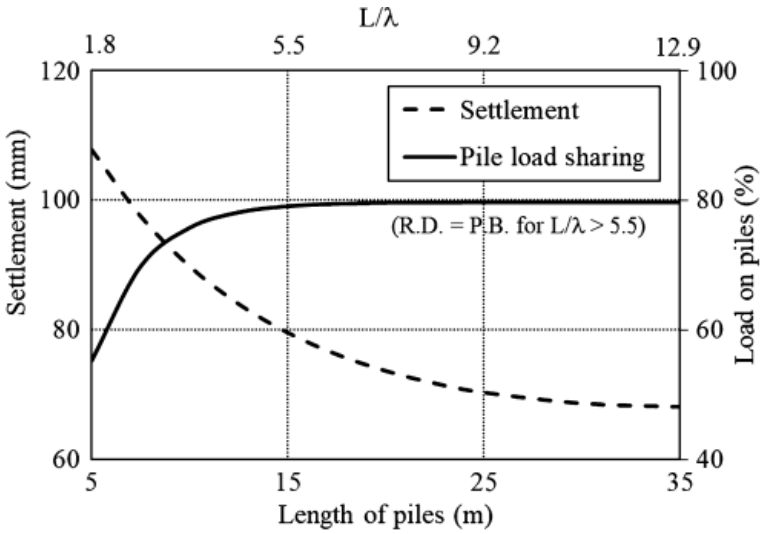


Figura 15. Efecto de la longitud del pilote sobre la variación del asentamiento y el reparto de carga del pilote.
Fuente: (Nasrollahi & Seyedi Hosseininia, 2019)

Referente a la rigidez del suelo, los valores de asentamiento y del reparto de la carga del pilote frente a varios valores del módulo de cortante Gs del suelo se muestra en la Figura 17 en la cual se puede observar que para un valor de Gs inferior a 30 MPa (suelos blandos) el asentamiento aumenta drásticamente. Dado que el aumento de Gs influye directamente en el valor de la interacción coeficiente de rigidez, se puede decir que la interacción pilote-suelo se asemeja a la misma condición de la rigidez del suelo. La carga compartida de los pilotes se reduce linealmente con una pendiente muy gradual a medida que aumenta el módulo de corte del suelo.

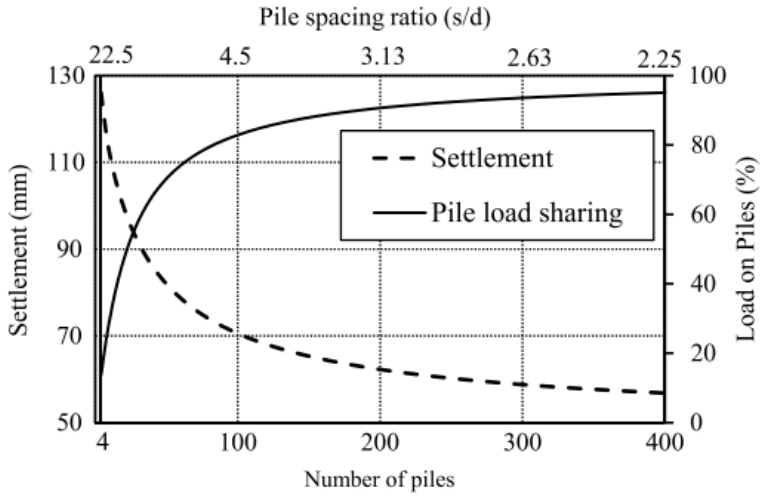


Figura 16. Influencia del número de pilotes sobre la variación del asentamiento y el reparto de carga del pilote.
Fuente: (Nasrollahi & Seyedi Hosseininia, 2019)

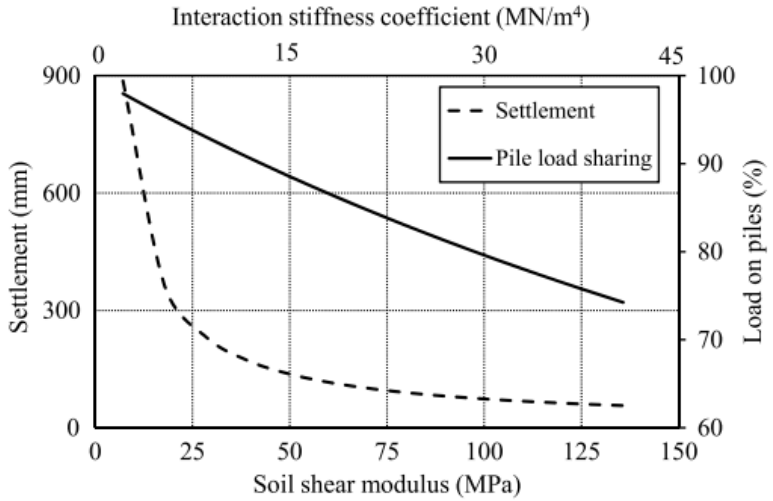


Figura 17. Influencia de la rigidez del suelo en el asentamiento
Fuente: (Nasrollahi & Seyedi Hosseininia, 2019)

El estudio mostró la importancia que tienen los parámetros como longitud de pilotes, espesor de la placa, la rigidez de suelo y números de pilotes en la reducción de asentamiento y el aumento de la capacidad de soporte del sistema, aunque el ultimo parámetro, número de pilotes, puede aumentar de forma significativa el costo de este sistema. Los parámetros aplicados en el estudio, excepto la variación de la rigidez del suelo con las deformaciones cortantes, fueron considerados en el presente trabajo de investigación.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Simulación numérica

Definición

La simulación numérica es una herramienta que permite obtener una solución a las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de fenómenos físicos reales. Dicho de otro modo, permiten predecir el estado de un sistema en función de sus entradas. La simulación numérica es especialmente útil cuando se aplica en el campo de la ingeniería. La mayoría de los fenómenos físicos (p.ej. movimiento de fluidos o deformaciones en sólidos sometidos a cargas) están modelizados matemáticamente por sistemas de ecuaciones en derivadas parciales, los cuales no se pueden resolver analíticamente (con lápiz y papel). Tan solo es posible alcanzar la solución analítica a versiones muy simplificadas de las ecuaciones originales, lo que limita su alcance considerablemente. Debido a ello, tradicionalmente, el diseño y la optimización de instalaciones o procesos en ingeniería requerían la construcción de costosos prototipos experimentales (Lynx Simulatiotions, n.d.).

Teorías explicativas

La simulación numérica, se basa en el estudio de fenómenos tanto físicos como naturales, partiendo del conocimiento de la ecuación diferencial relacionada con el problema y aplicando para su resolución métodos numéricos, basados en Diferencias Finitas, Elementos Finitos e Infinitos, Elementos de Contorno y Redes Neuronales (Minas; Energia, n.d.)

Gracias al desarrollo de los ordenadores y los métodos numéricos, es posible predecir el estado de un sistema de acuerdo con las ecuaciones que lo modelizan: es posible predecir con detalle el campo de velocidades y presiones en un fluido, o las deformaciones y tensiones en cada uno de los puntos de un sólido. El potencial de la simulación numérica ha generado que su uso no se limite a analizar procesos físicos o de ingeniería, sino que es utilizada en el estudio de fenómenos económicos, biológicos, etc. (Lynx Simulatiotions, n.d.)

De entre las aportaciones de la simulación numérica al mundo de la ingeniería, destacan las siguientes:

- Ahorro de costes y tiempo en los diseños. Ya no es necesario fabricar costosos prototipos para evaluar cómo funcionará el diseño; se puede conseguir mediante el modelado numérico del diseño.

- Optimización de los procesos y diseños. Mediante simulaciones bajo diferentes condiciones de funcionamiento y/o geometría es posible encontrar el punto de funcionamiento óptimo de los diseños o procesos.

- Conocimiento en detalle del proceso. A diferencia de los ensayos experimentales, la simulación numérica proporciona información completa del problema; los resultados numéricos permiten conocer el valor de cada una de las variables involucradas en cada punto de la geometría para cada instante de tiempo.

3.2.2 Pilotes

Definición y aplicación

Los pilotes son miembros estructurales hechos de acero, concreto y/o madera y son usados para construir cimentaciones (Braja M, 1999). Los pilotes de cimentación son necesarios en circunstancias especiales. Las siguientes son algunas situaciones en las que los pilotes pueden ser considerados para la construcción de una cimentación. (Das, 2001; Merritt, 2008).

1. Cuando la(s) capa(s) superior(es) del suelo es (son) altamente compresible(s) y demasiado débil(es) para soportar la carga transmitida por la superestructura, los pilotes se utilizan para transmitir la carga al lecho de roca subyacente o una capa de suelo más fuerte, como se muestra en la Figura 18a. Cuando no se encuentra lecho de roca a una profundidad razonable, los pilotes se utilizan para transmitir gradualmente la carga estructural al suelo. La resistencia a la carga estructural aplicada se deriva principalmente de la resistencia de fricción desarrollada en la interfase suelo-pilote (Figura 18b).
2. Cuando se someten a fuerzas horizontales (Figura 18c), los pilotes resisten flexionándose sin dejar de soportar la carga vertical transmitida por la superestructura. Esta situación se encuentra generalmente en el diseño y construcción de estructuras para la retención de tierra y cimentaciones de las estructuras altas que están sometidas a fuertes vientos y/o fuerzas sísmicas.
3. En muchos casos los suelos en el sitio propuesto para una estructura pueden ser expansivos y colapsables. Estos suelos pueden extenderse a una gran profundidad. Los suelos expansivos se hinchan y se contraen a medida que aumenta y disminuye el contenido de humedad, y la presión de abultamiento de estos suelos puede ser considerable. Si se utilizan cimentaciones de poca profundidad, la estructura puede sufrir daños importantes. Sin embargo, los pilotes de cimentación se pueden considerar como una alternativa cuando se extienden más allá de la zona activa, que se hincha y se contrae (Figura 18d).
4. Los cimientos de algunas estructuras, como las torres de transmisión, plataformas marinas y las losas del sótano por debajo del nivel freático, se someten a fuerzas de elevación. Los pilotes se utilizan a veces para que estas cimentaciones resistan la fuerza de elevación (Figura 18e).
5. Los contrafuertes de los puentes y muelles suelen ser construidos sobre pilotes para evitar la posible pérdida de la capacidad de carga que una cimentación poco profunda podría sufrir a causa de la erosión del suelo en la superficie del terreno (Figura 18f).

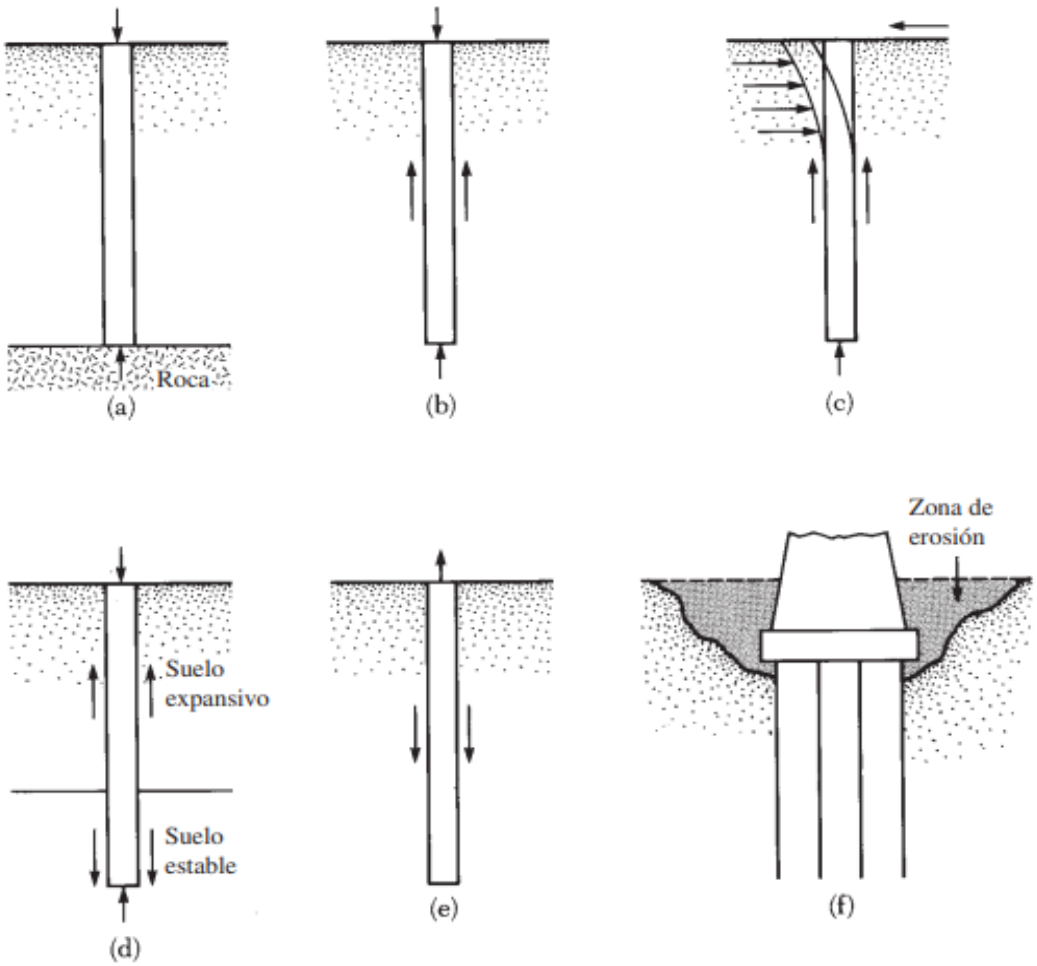


Figura 18. Condiciones para el uso de pilotes de cimentación
Fuente: (Das, 2001)

Pilotes individuales

Capacidad de carga de un pilote individual

La carga aplicada a un pilote aislado o individual es resistida conjuntamente por el suelo situado bajo la punta del pilote y por el terreno que rodea el fuste, siendo la máxima carga que el pilote puede soportar o capacidad de carga del pilote (Das, 2001; Lambe & Whitman, 2004).

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad \textit{(Ec. 1)}$$

Donde:
Q_p = capacidad de carga de la punta del pilote
Q_s = resistencia por fricción o por el fuste

La capacidad de soporte de carga de la punta del pilote, Q_p, está dada por (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

$$Q_p = A_p q_p = A_p(c' N_c^* + q' N_q^*) \qquad \textit{(Ec. 2)}$$

Donde:
A_p = área de la punta del pilote
c' = cohesión del suelo apoyando la punta del pilote
q_p = resistencia al punto de unidad
q' = tensión vertical eficaz a nivel de la punta del pilote
N_c^*, N_q^* = factores de capacidad de carga (Figura 19)

Pero cuando los pilotes se encuentran en arcillas saturadas en condiciones sin drenaje se puede utilizar la ecuación (Ec. 3) para determinar la capacidad de carga de la punta de los pilotes (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

$$Q_p = N_c^* C_U A_p = 9 C_u A_p \qquad \textit{(Ec. 3)}$$

Donde
C_u = cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote.

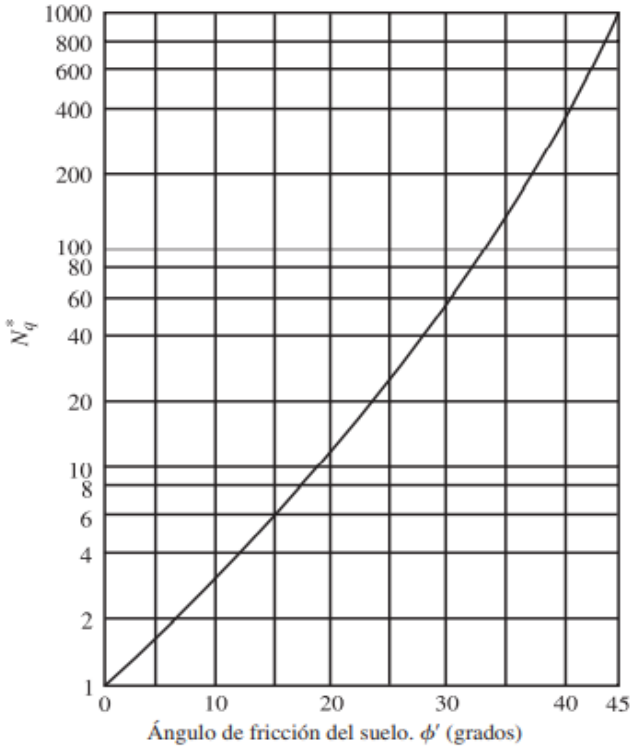


Figura 19. Factor de capacidad de carga de Meyerhof, , N_q^*
Fuente: (Das, 2001)

La resistencia a la fricción, Q_s, está dada por (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

$$Q_s = \Sigma p(\Delta L) f \qquad \textit{(Ec. 4)}$$

Donde:
p = perímetro de la sección del pilote
ΔL = longitud incremental del pilote sobre el que p y f son tomados como constantes
f = resistencia unitaria a la fricción a cualquier profundidad z

Para la determinación de la resistencia unitaria a la fricción en suelos arcillosos existen diferentes métodos. A continuación, se describe dos procedimientos.

1. Método λ: este método mencionado por Das (2001), fue propuesto por Vijayvergiya y Focht. Se basa en el supuesto de que el desplazamiento del suelo causado por la colocación de pilotes resulta en una presión lateral a cualquier profundidad. La resistencia unitaria promedio por fricción está dada por:

$$f_{prom} = \lambda(\sigma'_o + 2C_u) \qquad \textit{(Ec. 5)}$$

Donde:
λ = este coeficiente se varia con la longitud del pilote (Tabla 2)
σ'_o = esfuerzo efectivo vertical para toda la longitud de empotramiento
C_u = resistencia al corte no drenado promedio

2. Método α: este método presenta la resistencia unitaria de la superficie en suelos arcillosos por (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

$$f = \alpha C_u \qquad \textit{(Ec. 6)}$$

Donde:
α = factor de adhesión empírica. La variación aproximada de su valor se presenta en la Figura 20.

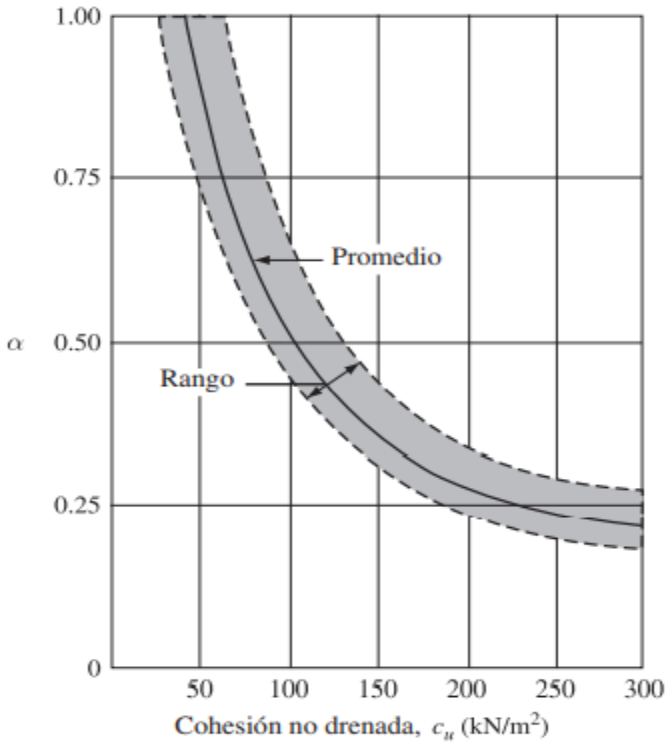


Figura 20. Variación de α con la cohesión no drenada de la arcilla
Fuente: (Das, 2001)

Tabla 2. Variación de λ con L

L (m)	λ	L (m)	λ
0	0.5	35	0.136
5	0.318	40	0.127
10	0.255	50	0.123
15	0.205	60	0.118
20	0.177	70	0.117
25	0.155	80	0.117
30	0.145	90	0.117

Fuente: (Das, 2001)

Capacidad de carga última de pilotes a partir de curvas de carga-asentamiento

La estimación de capacidad de carga última de pilotes a partir de prueba de carga de pilote no siempre está bien definida. La curva carga-asentamiento (a) en la Figura 21 muestra una carga última bien definida, mientras que la curva (b) no. Para obtener la carga última de la curva (b), se han sugerido varios procedimientos empíricos. Un método simple es encontrar la intersección de las tangentes de las dos partes de la curva y el valor en la ordenada de la intersección es la carga última del pilote (Budhu et al., 2018).

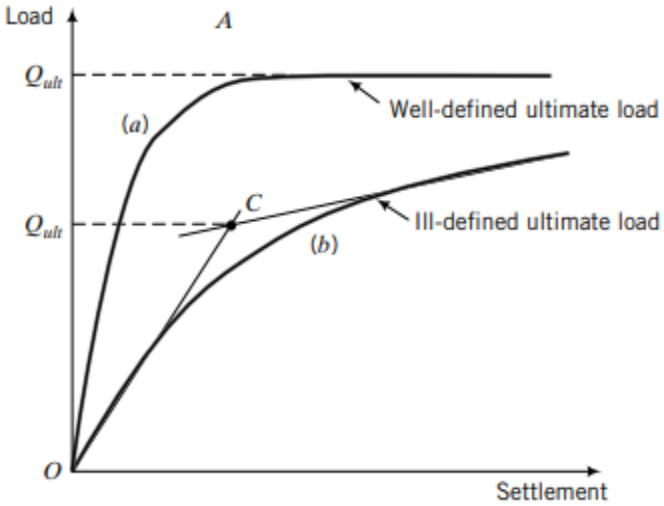


Figura 21. Curvas de carga vs asentamiento
Fuente: (Budhu et al., 2018)

Asentamiento en pilotes individuales

El asentamiento elástico de un pilote bajo una carga de trabajo vertical, Q_W , está determinado por tres factores (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \qquad \textit{(Ec. 7)}$$

Donde:
S_e = asentamiento total del pilote
$S_{e(1)}$ = asentamiento del eje del pilote

$S_{e(2)}$ = asentamiento causado por la carga en la punta del pilote
$S_{e(3)}$ = asentamiento causado por la carga transmitida a lo largo del eje del pilote

1. Se supone que el material del pilote es elástico, la deformación del eje del pilote puede ser evaluada utilizando los principios fundamentales de mecánica de materiales (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \quad \textit{(Ec. 8)}$$

Donde:
Q_{wp} = carga soportada en el punto del pilote en condiciones de carga de trabajo
Q_{ws} = carga soportada por la resistencia a la fricción (superficial) en condiciones de carga de trabajo
A_p = área de la sección transversal del pilote
L = longitud del pilote
E_p = módulo de elasticidad del material del pilote

La magnitud de ξ depende de la naturaleza de la distribución de la resistencia unitaria a la fricción (superficial) a lo largo del eje del pilote. Puede variar entre 0.5 y 0.67.

2. El asentamiento de un pilote causado por la carga soportada por la punta del pilote se puede expresar como (BRAJA M, 2011; Budhu et al., 2018):

$$S_{e(2)} = \frac{Q_{wp} D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad \textit{(Ec. 9)}$$

Donde:
D = ancho o diámetro del pilote
Q_{wp} = punto de carga por unidad de superficie en la punta del pilote = Q_{wp}/A_p
E_s = módulo de elasticidad del suelo en o por debajo de la punta del pilote
μ_s = Coeficiente de suelo de Poisson
I_{wp} = factor de influencia ≈ 0.85

3. El asentamiento de un pilote causado por la carga soportada a lo largo del eje está dado por una relación similar a la siguiente ecuación (Das, 2001):

$$S_{e(3)} = \frac{Q_{ws} D}{pLE_s}(1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad \textit{(Ec. 10)}$$

Donde:
p = perímetro del pilote
L = longitud empotrada del pilote
I_{ws} = factor de influencia

El factor de influencia, I_{ws}, tiene una sencilla relación empírica:

$$I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{\frac{L}{D}} \quad \textit{(Ec. 11)}$$

Grupos de pilotes

En la mayoría de casos, los pilotes se usan en grupos para transmitir la carga estructural al suelo (ver Figura 22a). En general la capacidad de carga de un grupo de pilotes no es igual a la suma de las capacidades de cada uno de ellos, actuando aisladamente. El cociente entre la capacidad de carga del pilotaje y la suma de las capacidades de carga individuales se denomina eficiencia del grupo o factor de reducción. La eficiencia de un grupo de pilotes flotantes en arcilla suele ser inferior a 1 mientras que la eficiencia de grupo de pilotes flotantes en arena es mayor de 1. La eficiencia de grupo de pilotes descansando por la punta suele ser normalmente inferior a 1 (Lambe & Whitman, 2004).

La eficiencia de un grupo de pilotes depende de la forma y la longitud de los pilotes, del tipo suelo con el cual está interactuando, además se tiene en cuenta la interacción de pilotes entre sí y el suelo (Vargas Díaz, 2020). La interacción de pilotes entre sí y el suelo puede genera que la capacidad de un pilote dentro de un grupo se reduzca en comparación con un solo pilote aislado. En particular, para los pilotes hincados en arcillas blandas, el aumento de la tensión efectiva en el suelo circundante puede ser menor para los pilotes en un grupo, que para los pilotes individuales y esto dará lugar a una menor capacidad de los fustes (Engineering, 2017).

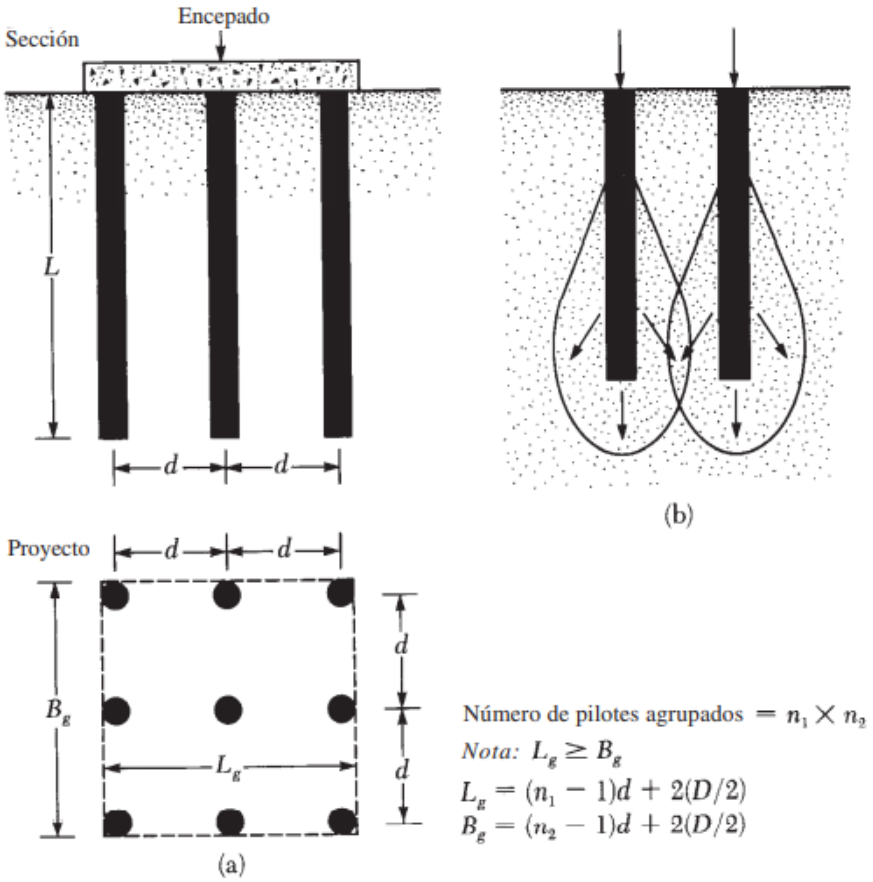


Figura 22. Grupos de pilote
Fuente: (Das, 2001)

Cuando los pilotes se colocan uno cerca del otro, una suposición razonable es que los esfuerzos transmitidos por los pilotes al suelo se traslapan (ver Figura 22b), reduciendo así la capacidad de soporte de carga de los pilotes. Idealmente, los pilotes en un grupo se deben espaciar de manera que la capacidad de soporte de carga del grupo no sea menor que la suma de la capacidad de soporte de los pilotes individuales. En la práctica, la separación mínima de centro a centro del pilote, d, es 2.5D y en situaciones normales está realmente cerca de 3D a 3.5D (BRAJA M, 2011; Budhu et al., 2018).

La eficiencia de la capacidad de soporte de carga de un grupo de pilotes se puede definir como (BRAJA M, 2011; Budhu et al., 2018):

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\Sigma Q_u} \qquad \textit{(Ec. 12)}$$

Donde:
η = eficiencia de grupo
$Q_{g(u)}$ = capacidad de carga máxima del grupo de pilotes
Q_u = capacidad de carga máxima de cada pilote sin el efecto de grupo

Capacidad de grupos de pilotes en arena

Con base en las observaciones experimentales del comportamiento de los pilotes agrupados en arena hasta la fecha, se pueden extraer dos conclusiones generales (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

1. Para grupos de pilotes clavados en arena con $d \geq 3D$, $Q_{g(u)}$ puede ser tomado como ΣQ_u, que incluye la fricción y la capacidad de carga en la punta de pilotes individuales.
2. Para grupos de pilotes perforados en arena con separaciones convencionales $d \approx 3D$, $Q_{g(u)}$ puede ser tomado como 2/3 a 3/4 veces Q_u (capacidades de punto de apoyo y de fricción de pilotes individuales).

Capacidad de grupos de pilotes en arcilla

La capacidad última de carga del grupo de pilotes en arcilla puede ser estimada con el siguiente procedimiento (BRAJA M, 2011; Das, 2001) :

1. Determinar con la ecuación:

$$\Sigma Q_u = n_1 n_2 (Q_p + Q_s) \qquad \textit{(Ec. 13)}$$

$$Q_p = A_p (9 C_{u(p)}) \qquad \textit{(Ec. 14)}$$

$$Q_s = \Sigma \alpha p C_u \Delta L \qquad \textit{(Ec. 15)}$$

2. Determinar la capacidad última suponiendo que los pilotes en el grupo actúan como un bloque con dimensiones de $L_g \times B_g \times L$. La resistencia superficial del bloque es:

$$\Sigma Q_u = L_g B_g C_{u(p)} N_c^* + \Sigma 2 (L_g + B_g) C_u \Delta L \qquad \textit{(Ec. 16)}$$

3. Comparar los valores obtenidos a partir de las ecuaciones del inciso 1 y 2. El menor de los dos valores es $Q_{g(u)}$.

Asentamiento elástico de un grupo de pilotes

En la literatura han sido reportadas varias investigaciones relativas al asentamiento de un grupo de pilotes con resultados muy variables. La relación más simple para el asentamiento del grupo de pilotes fue dada por Vesic (1969) como:

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}} S_e \qquad \textit{(Ec. 17)}$$

Donde:
$S_{g(e)}$ = asentamiento elástico del grupo de pilotes
B_g = ancho de sección del grupo de pilotes
D = anchura o diámetro de cada pilote en el grupo
S_e = asentamiento elástico de cada pilote con carga de trabajo comparable

3.2.3 Deformaciones

Las cargas transmitidas por las cimentaciones al suelo dan lugar a deformaciones del terreno que se traducen en asentamientos, desplazamientos horizontales y giros de la estructura que, si resultan excesivos, por encima de los tolerables, podrán originar una pérdida de la funcionalidad, producir fisuras, agrietamientos u otras patologías (Meli, 2000).

Asentamientos

Asentamiento es un movimiento descendente vertical del terreno (subsidencia) debido a la aplicación de cargas. En general, el asentamiento del suelo causado por la carga puede dividirse en dos amplias categorías (BRAJA M, 2011; Das, 2001):

1. Asentamiento elástico, que es causado por la deformación elástica del suelo seco y de los suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el contenido de humedad. Los cálculos de los asentamientos elásticos se basan generalmente en ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.
2. Asentamiento de consolidación, que es el resultado del cambio de volumen en un suelo cohesivo saturado debido a la expulsión de agua intersticial. El asentamiento de consolidación es dependiente del tiempo.

Desplazamientos laterales

Es el movimiento horizontal causado por cargas laterales a las que está sujeta la cimentación. Las cargas laterales pueden ser activas, cuando se deben a las acciones externas impuestas a las estructuras o pasivas cuando son derivadas del empuje del suelo.

3.3 SINTESIS

En la primera parte de este capítulo, se presentaron algunos resultados de trabajos de investigación sobre respuesta mecánica de grupos de pilotes y de sistema de placa pilotes analizados generalmente en suelos arcillosos de baja capacidad. Los resultados presentados concluyen que con la mayor separación entre pilotes se genera menos desplazamiento, también, con mayor número de pilotes o con pilotes de mayor longitud se

disminuye el asentamiento cuando las cargas aplicadas son constantes. No obstante, en los resultados de eficiencia de grupos de pilotes, se disminuye con el incremento número de pilotes.

En la segunda parte, se mostraron las aportaciones de las herramientas de simulación numérica como el ahorro de tiempo y costos en los diseños, y optimización de los procesos de diseños. También, se describieron el funcionamiento de los pilotes, los diferentes métodos para determinar su capacidad de cargas últimas en suelos arcillosos y los diferentes asentamientos generados en ellos.

4. METODOLOGÍA

En la primera sección de este capítulo se presenta las diferentes fuentes usadas para la obtención de propiedades geotécnicas de los suelos lacustres del depósito lacustres de Bogotá y luego tablas del perfil de análisis geotécnico promedio de los suelos lacustres de Bogotá definido para este trabajo. En la segunda sección, se determinan las magnitudes y los tipos de cargas a aplicar a los pilotes en los modelos de la simulación numérica. En la tercera sección, se presentan la metodología utilizada para la modelación, la validación de los modelos y los casos considerados en el estudio de la simulación numérica.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ARCILLOSOS DE LA SABANA DE BOGOTÁ

4.1.1 Propiedades Geotécnicas a partir de Fuentes de Información Secundaria

Para obtener un perfil geotécnico representativo de los suelos lacustres de Bogotá para la modelación de los grupos de pilotes, se recolectaron parámetros geotécnicos provenientes de resultados de investigaciones geotécnicas realizadas en la zona lacustre para la primera línea del metro de Bogotá. En la Figura 23 se presentan parámetros de caracterización y en la Tabla 3 se presentan los parámetros de diseño de resistencia, deformación y consolidación utilizadas para el diseño de la cimentación de viaducto en el tramo 3.5 ubicado en suelos lacustres 200, los cuales conllevan a clasificar el perfil de suelo como de tipo E - Suelos Blandos (Fonseca et al., 2015; Primera et al., 2018; SYSTRA & INGETEC, 2018).

También parámetros de diseños fueron recolectados a partir de estudios sobre el comportamiento mecánico de los suelos de los depósitos lacustres de Bogotá (Caicedo et al., 2019) en el cual se presentan propiedades físicas como contenido de agua, índice de consistencia, cohesión no drenada, estratigrafía y entre otras de los suelos (ver Figura 1). Caicedo et al. (2018), en su trabajo de investigación sobre el comportamiento de los suelos de diatomeas de los depósitos lacustres por el cual se perforaron un total de 52 pozos con una longitud total de 2400 m donde 6 pozos alcanzaron profundidades superiores a 100 m y 2 alcanzaron profundidades de 240 m. Se presentaron propiedades geotécnicas como límite de Atterberg, contenido de agua, cohesión no drenada, tamaño de las partículas de los suelos, entre otras (Ver Figura 24).

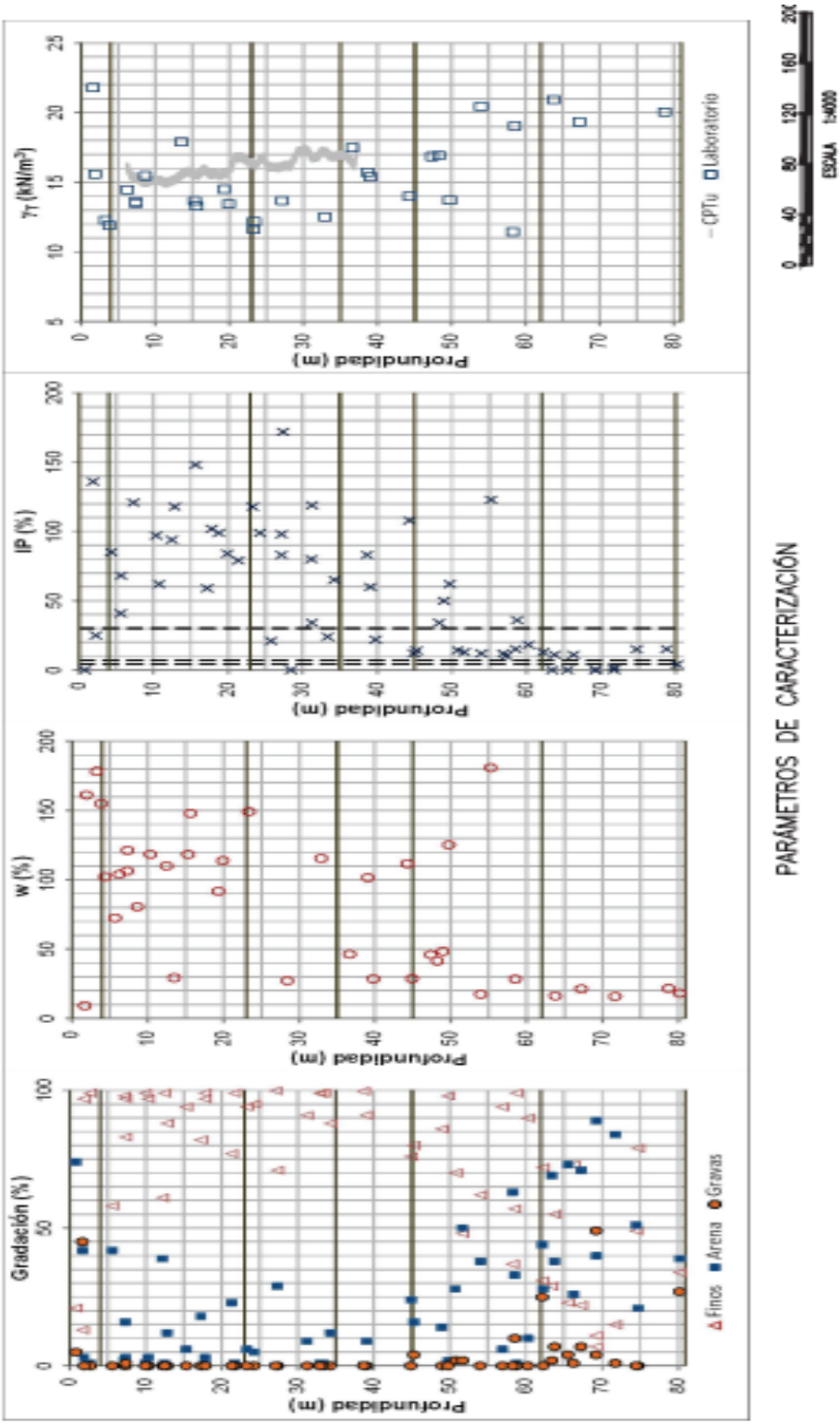


Figura 23. Parámetros de caracterización de los suelos lacustres 200
Fuente:(Fonseca et al., 2015)

Tabla 3. Resumen de parámetros de diseño en lacustre 200

Estrato	Prof (m)	N_{60}	Su (kPa)	ϕ (°)	Es (MPa)	C_c	C_c	e_0
U1	0,00 - 4,00	4	15		1,6	1,09	0,12	3,436
U2	4,00 - 23,00	6	15		2,8	1,43	0,21	2,673
U3	23,00 - 35,00	8	25		9,7	0,51	0,09	1,000
U4	35,00 - 45,00	8	79		23,6	0,76	0,09	1,768
U5	45,00 - 62,00	16	30		10,1	0,58	0,06	1,507
U6	62,00 - 70,00	20		31	30,5			

Fuente:(Primera et al., 2018; SYSTRA & INGETEC, 2018)

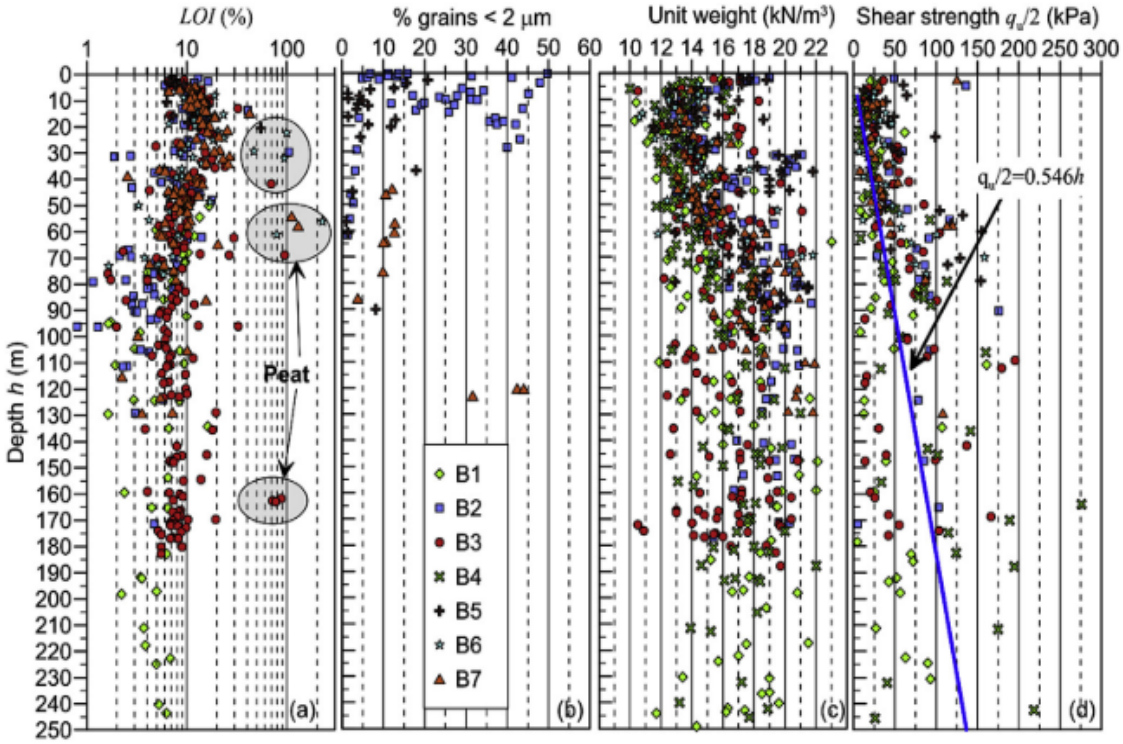


Figura 24. (a) Perdida por ignición (b) Proporción de partículas con tamaños inferiores a 2 mm (c) Peso unitario (d) Cohesión no drenada
Fuente: (Caicedo et al., 2018)

Del trabajo de "Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones" (Puerto et al., 2010)**,** se recolectaron propiedades geotécnicas como contenido de agua, índice de plasticidad, relación de vacío, peso unitario y descripción geotécnica de diferentes capas de los suelos de los depósitos lacustres. En el trabajo de Parra-Gómez, (2019), "*Spatial geotechnical modeling of a lacustrine deposit using functional geostatistical analysis of CPTu tests*", se presentaron resultados de un total de 325 de pruebas de penetración con cono (CPTU) realizadas en los suelos de los depósitos lacustres de Bogotá (ver Figura 25). Además, se recolectaron parámetros

geotécnicos de estudios de interacción de estructuras con los suelos lacustres de Bogotá (Monzón & Varela, 2018; Pineda-Jaimes et al., 2020).

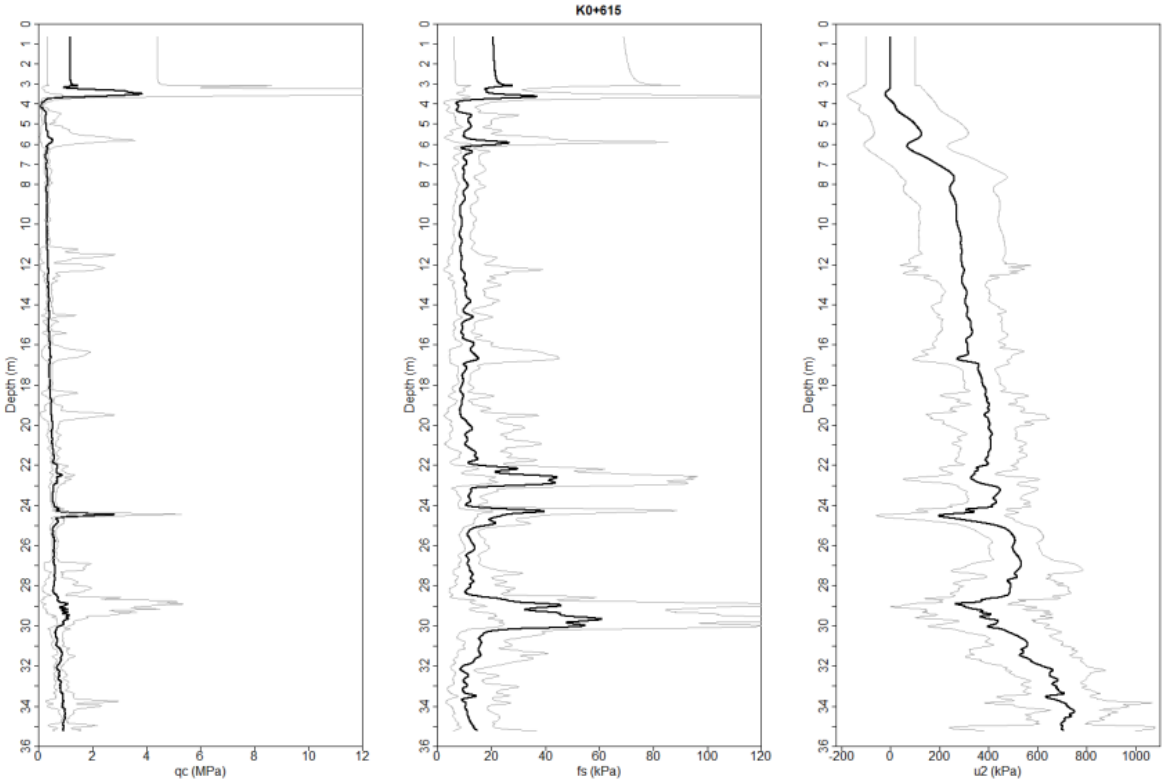


Figura 25. qc, Resistencia del cono por punta; fs, Fricción lateral medida; u2, Presión de poros
Fuente: (Parra-Gómez, 2019)

4.1.2 Perfil de Análisis Geotécnico Definido para este Trabajo

A partir de los datos recolectados sobre las propiedades geotécnicas de los suelos lacustres de Bogotá, se realizó a partir de la consolidación de una base de datos de más de cien estudios geotécnicos, realizando un análisis estadístico, un perfil geotécnico promedio cuyos 6 estratos con el cual se realizaron los estudios del método de elementos finitos para los grupos de pilotes en dichos suelos. En la Tabla 4, se presentan los materiales, el promedio, el máximo, el mínimo y la desviación estándar del incide de plasticidad y de relación de vacío de cada capa. En la Tabla 5, se presentan el promedio, el máximo, el mínimo y la desviación estándar del peso unitario, de la cohesión no drenada, del módulo de Young no drenado, del ángulo de fricción no drenado, de la permeabilidad y del coeficiente de Poisson de los estratos. En la Gráfica 1 se puede observar la variación de los valores con profundidad de peso unitario, de la cohesión no drenada, del módulo de Young no drenado, del ángulo de fricción no drenado y del índice de plasticidad del perfil geotécnico promedio.

Tabla 4. Perfil geotécnico promedio de los suelos lacustres de Bogotá

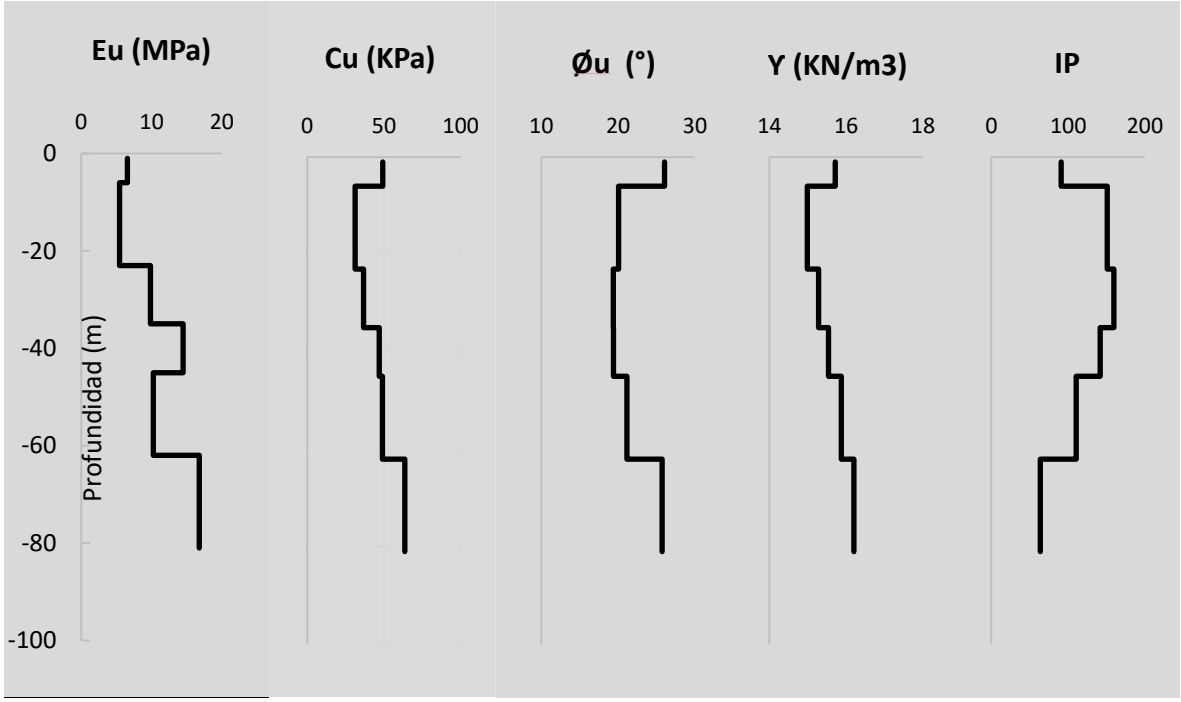
Profundidad (m)		Material	Descripción	IP	Relación de vacío
1	6	CH	Arcilla marrón oscura, presencia de turba, restos vegetales, con fragmentos de gravas de areniscas grisáceas cuarzosas, humedad alta, plasticidad alta a muy alta, consistencia muy blanda.	Prom: 91.2 Min: 44.91 Max: 200 σ: 52.58	Prom: 2.54 Min: 1.69 Max: 3.93 σ: 0.75
6	23	CH/CL	Arcilla limosa marrón oscura a gris oliva, presencia de turba, con trazas de arena fina y gruesa, trazas de gravas finas, presencia de turbas y materia orgánica, humedad muy alta, plasticidad muy alta, consistencia de blanda a muy blanda.	Prom: 151.06 Min: 80.58 Max: 200 σ: 49.64	Prom: 3.26 Min: 2.67 Max: 3.93 σ: 0.51
23	35	CH/CL	Arcilla y arcilla limosa de tonalidad grisácea a beige, presencia de materia orgánica, turba y restos vegetales, presencia de lentes de arena de granos finos, razas de gravas sub-angulares, humedad alta, plasticidad media a alta, consistencia medio firme a firme.	Prom: 159.75 Min: 127.83 Max: 265 σ: 42.84	Prom: 2.51 Min: 1 Max: 4.89 σ: 1.19
35	45	CH/MH	Arcilla de tonalidades marrón oliva a grisácea, con presencia de turba negra limo-arcillosa y restos vegetales, algo de arena y fragmentos de gravas de grano fino, humedad media, plasticidad media a alta, consistencia firme.	Prom: 141.92 Min: 100 Max: 170 σ: 24.93	Prom: 2.54 Min: 1.77 Max: 3.21 σ: 0.62
45	62	CH/CL	Arcilla y arcilla arenosa de color gris verdoso a gris pardusco, con presencia de arenas finas a gruesas y lentes de gravas gruesas sub-redondeadas y angulosas de hasta 8 cm, presencia de materia orgánica, húmeda media a muy alta, plasticidad alta a muy alta, consistencia medio firme.	Prom: 110.64 Min: 70 Max: 127.83 σ: 25.5	Prom: 2.18 Min: 1.51 Max: 2.88 σ: 0.63
62	80	SC	Arenas de grano fino a medio de tonalidades blancas y amarillas, con algunos fragmentos de gravas redondeadas de arenisca, con algo de arcilla arenosa, humedad muy baja, plasticidad baja a no plásticas, densas.	Prom: 63.89 Min: 40 Max: 210 σ: 54.36	Prom: 2.25 Min: 1.29 Max: 3.93 σ: 0.87

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Perfil geotécnico promedio de los suelos lacustres de Bogotá

Prof. (m)	Peso unitario (KN/m^3)	Angulo de fricción no drenado (°)	Cohesión no drenada (KN/m^2)	Módulo de Young no drenado (KN/m^2)	Poisson	Permeabilidad (m/s)
1 6	Prom: 15.72 Min: 13.73 Max: 16.74 σ: 0.65	Prom: 26.05 Min: 21.35 Max: 29 σ: 3.46	Prom: 49.12 Min: 15 Max: 110 σ: 34.27	Prom: 6549.33 Min: 1600 Max: 10604 σ: 3647.79	Prom: 0.39 Min: 0.37 Max: 0.4 σ: 0.02	Prom: 6.99 Min: 6.99 Max: 6.99 σ: 0
6 23	Prom: 14.99 Min: 13.73 Max: 17 σ: 0.77	Prom: 20.07 Min: 12.51 Max: 28.13 σ: 6.22	Prom: 31.19 Min: 9.59 Max: 80 σ: 20.35	Prom: 5445.31 Min: 2800 Max: 14198 σ: 3046.24	Prom: 0.39 Min: 0.38 Max: 0.4 σ: 0.01	Prom: 5.81 Min: 5.67 Max: 5.97 σ: 0.15
23 35	Prom: 15.28 Min: 10.79 Max: 17 σ: 1.29	Prom: 19.38 Min: 13.67 Max: 28.5 σ: 6.59	Prom: 36.65 Min: 16.17 Max: 62 σ: 17.36	Prom: 9846 Min: 5640 Max: 14198 σ: 3544.9	Prom: 0.39 Min: 0.38 Max: 0.4 σ: 0.01	Prom: 5.67 Min: 5.67 Max: 5.67 σ: 0
35 45	Prom: 15.54 Min: 14.6 Max: 17 σ: 0.85	Prom: 19.39 Min: 13.67 Max: 28.5 σ: 6.62	Prom: 46.94 Min: 16.17 Max: 79 σ: 22.25	Prom: 14479.33 Min: 5640 Max: 23600 σ: 7460.23	Prom: 0.39 Min: 0.38 Max: 0.4 σ: 0.01	Prom: 5.67 Min: 5.67 Max: 5.67 σ: 0
45 62	Prom: 15.87 Min: 14.6 Max: 18 σ: 0.78	Prom: 21.15 Min: 13.67 Max: 28.5 σ: 6.59	Prom: 48.89 Min: 16.17 Max: 100 σ: 21.38	Prom: 10244.04 Min: 5640 Max: 23600 σ: 4012.08	Prom: 0.39 Min: 0.38 Max: 0.4 σ: 0.01	Prom: 5.67 Min: 5.67 Max: 5.67 σ: 0
62 80	Prom: 16.2 Min: 12.75 Max: 18 σ: 1.12	Prom: 25.72 Min: 16 Max: 35.44 σ: 9.86	Prom: 63.58 Min: 48 Max: 89.6 σ: 9.05	Prom: 16779.33 Min: 5640 Max: 30500 σ: 10408.71	Prom: 0.34 Min: 0.3 Max: 0.4 σ: 0.03	Prom: 5.67 Min: 5.67 Max: 5.67 σ: 0

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 1. Variación de parámetros del perfil geotécnico promedio con profundidad
Fuente: Elaboración propia

4.2 CARGAS APLICADAS A LOS PILOTES EN LOS MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

4.2.1 Cargas axiales

Las cargas axiales aplicadas en las simulaciones son la capacidad de carga resistida por el fuste y la punta de pilotes aislados menos su propio peso en los suelos en estudio. En la determinación de la resistencia por fricción para la capacidad ultima de los pilotes individuales no se tomaron en cuenta el efecto de fricción negativa para estos estudios. En la Tabla 12, se presentan las cargas axiales aplicadas para los diferentes diámetros y longitudes de pilotes usados en los modelos.

Resistencia por fricción y capacidad de carga de punta de los pilotes:

- Pilotes de longitud 25 m:

Tabla 6. Resistencia por fricción para pilotes de 25m de longitud

Capa	Prof. (m) (Tabla 5)	ΔL (m)	α (Figura 20)	Cu (KN/m^2) (Tabla 5)	αΔLCu
1	1-6	5	1.00	49.12	245.60
2	6-23	17	1.00	31.19	530.21
3	23-35	3	1.00	36.65	109.94
				∑	885.75

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación (Ec. 4), la resistencia por fricción es: $Q_s = 529.58\,p$

De la ecuación (Ec. 3), la resistencia de la punta de los pilotes es: $Q_p = 329.85\,A_p$

- Pilotes de longitud de 30 m:

Tabla 7. Resistencia por fricción para pilotes de 30m de longitud

Capa	Prof. (m) (Tabla 5)	ΔL (m)	α (Figura 20)	Cu (KN/m^2) (Tabla 5)	αΔLCu
1	1-6	5	1.00	49.12	245.60
2	6-23	17	1.00	31.19	530.21
3	23-35	8	1.00	36.65	293.17
				∑	1068.98

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación (Ec. 4), la resistencia por fricción es: $Q_s = 1068.98\,p$

De la ecuación (Ec. 3), la resistencia de la punta de los pilotes es: $Q_p = 329.85\,A_p$

- Pilotes de longitud de 35 m:

Tabla 8. Resistencia por fricción para pilotes de 35m de longitud

Capa	Prof. (m) (Tabla 5)	ΔL (m)	α (Figura 20)	Cu (KN/m^2) (Tabla 5)	αΔLCu
1	1-6	5	1.00	49.12	245.60
2	6-23	17	1.00	31.19	530.21
3	23-35	12	1.00	36.65	439.75
4	35-45	1	1.00	46.94	46.938
				∑	1262.50

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación (Ec. 4), la resistencia por fricción es: $Q_s = 1262.50\,p$

De la ecuación (Ec. 3), la resistencia de la punta de los pilotes es: $Q_p = 422.46\,A_p$

- Pilotes de longitud de 40 m:

Tabla 9. Resistencia por fricción para pilotes de 40m de longitud

Capa	Prof. (m) (Tabla 5)	ΔL (m)	α (Figura 20)	Cu (KN/m^2) (Tabla 5)	αΔLCu
1	1-6	5	1.00	49.12	245.60
2	6-23	17	1.00	31.19	530.21
3	23-35	12	1.00	36.65	439.75
4	35-45	6	1.00	46.94	281.628
				$\sum$	1497.19

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación (Ec. 4), la resistencia por fricción es: $Q_s = 1497.19\, p$

De la ecuación (Ec. 3), la resistencia de la punta de los pilotes es: $Q_p = 422.46\, A_p$

- Pilotes de longitud de 45 m:

Tabla 10. Resistencia por fricción para pilotes de 45m de longitud

Capa	Prof. (m) (Tabla 5)	ΔL (m)	α (Figura 20)	Cu (KN/m^2) (Tabla 5)	αΔLCu
1	1-6	5	1.00	49.12	245.60
2	6-23	17	1.00	31.19	530.21
3	23-35	12	1.00	36.65	439.75
4	35-45	10	1.00	46.94	469.38
5	45-62	1	1.00	48.89	48.89
				$\sum$	1733.83

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación (Ec. 4), la resistencia por fricción es: $Q_s = 1733.83\, p$

De la ecuación (Ec. 3), la resistencia de la punta de los pilotes es: $Q_p = 440.01\, A_p$

- Pilotes de longitud de 50 m:

Tabla 11. Resistencia por fricción para pilotes de 50m de longitud

Capa	Prof. (m) (Tabla 5)	ΔL (m)	α (Figura 20)	Cu (KN/m^2) (Tabla 5)	αΔLCu
1	1-6	5	1.00	49.12	245.60
2	6-23	17	1.00	31.19	530.21
3	23-35	12	1.00	36.65	439.75
4	35-45	10	1.00	46.94	469.38
5	45-62	6	1.00	48.89	293.35
				$\sum$	1978.28

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación (Ec. 4), la resistencia por fricción es: $Q_s = 1978.28\, p$

De la ecuación (Ec. 3), la resistencia de la punta de los pilotes es: $Q_p = 440.01\ A_p$

Tabla 12. Cargas axiales aplicadas

Diámetro (m)	Longitud (m)	Peso propio (KN)	Capacidad de carga			
			Punta Qp (KN)	Fricción Qs (KN)	Total (KN)	Carga aplicada (KN)
0.40	25	73.97	41.45	1113.06	1154.51	1080.54
	30	88.76	41.45	1343.31	1384.76	1296.00
	35	103.55	53.09	1586.50	1639.58	1536.03
	40	118.35	53.09	1881.42	1934.51	1816.16
	45	133.14	55.29	2178.79	2234.09	2100.95
	50	147.93	55.29	2485.98	2541.28	2393.35
0.60	25	166.42	93.25	1669.59	1762.85	1596.42
	30	199.71	93.25	2014.97	2108.22	1908.52
	35	232.99	119.44	2379.75	2499.19	2266.20
	40	266.28	119.44	2822.13	2941.57	2675.30
	45	299.56	124.41	3268.19	3392.60	3093.04
	50	332.85	124.41	3728.98	3853.39	3520.54
0.80	25	295.86	165.78	2226.13	2391.91	2096.04
	30	355.04	165.78	2686.63	2852.41	2497.37
	35	414.21	212.34	3173.00	3385.34	2971.13
	40	473.38	212.34	3762.84	3975.18	3501.80
	45	532.55	221.18	4357.59	4578.77	4046.21
	50	591.73	221.18	4971.97	5193.15	4601.42

Fuente: Elaboración propia

En los cálculos se consideraron un material elástico para los pilotes. El material utilizado fue concreto de f'c=30MPa. Para determinar el módulo de elasticidad del concreto Ec, se aplicó la ecuación proporcionada en el capítulo C.8 del Título C de NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010):

$$E_c = 4700\sqrt{f'c}$$

4.2.2 Cargas laterales

Para los estudios del comportamiento mecánico de los grupos de pilotes ante las cargas laterales en los suelos arcillosos del lacustre de Bogotá se considera, en un primer lugar, una carga lateral equivalente a 40% de la capacidad de carga última del pilote individual y ésta se aplica a cada pilote dentro de los grupos. Por otra parte, se consideran una carga lateral de 200 KN y otra de 800 KN donde estas dos últimas se aplican a los grupos de pilotes.

4.3 MODELACIÓN NUMÉRICA

4.3.1 Software

El software de elementos finitos utilizado para realizar el presente estudio fue Midas GTS NX. Es un software de análisis de elementos finitos para el análisis geotécnico avanzado de la deformación y estabilidad del suelo y la roca, así como flujo de agua subterránea, vibraciones dinámicas e interacción suelo-estructura en 2D y 3D (GTS NX Geotechnical FEA Software - MIDAS IT, n.d.). GTS NX se utiliza para análisis, pruebas y diseño por ingenieros geotécnicos, civiles y de minería. Está diseñado para adaptarse a cualquier tipo de proyecto geotécnico.

GTS NX maneja la gama completa de análisis de cimientos. Se puede realizar análisis exhaustivos de zapatas extendidas, cimentaciones profundas, cimentaciones de pilotes y cimentaciones de ejes. El postprocesador avanzado generará resultados que luego puede utilizar para determinar el movimiento horizontal de la cimentación de pilotes, la capacidad de carga y los asentamientos diferenciales. El programa también tiene la capacidad única y ventajosa de simular el comportamiento de grupos de pilotes. Además, tiene capacidades de análisis de cimentaciones que también se extienden a la investigación de los efectos de nuevas cimentaciones en estructuras existentes. GTS NX permite estudiar completamente el asentamiento y la disminución de la estabilidad de las estructuras adyacentes debido a la carga adicional causada por la base de su proyecto.

4.3.2 Modelación

En la siguiente figura se presenta el diagrama de flujo de las diferentes etapas que forman parte del proceso de modelación de los pilotes en el programa Midas GTS NX y posteriormente se describen cada una de las etapas mencionadas.

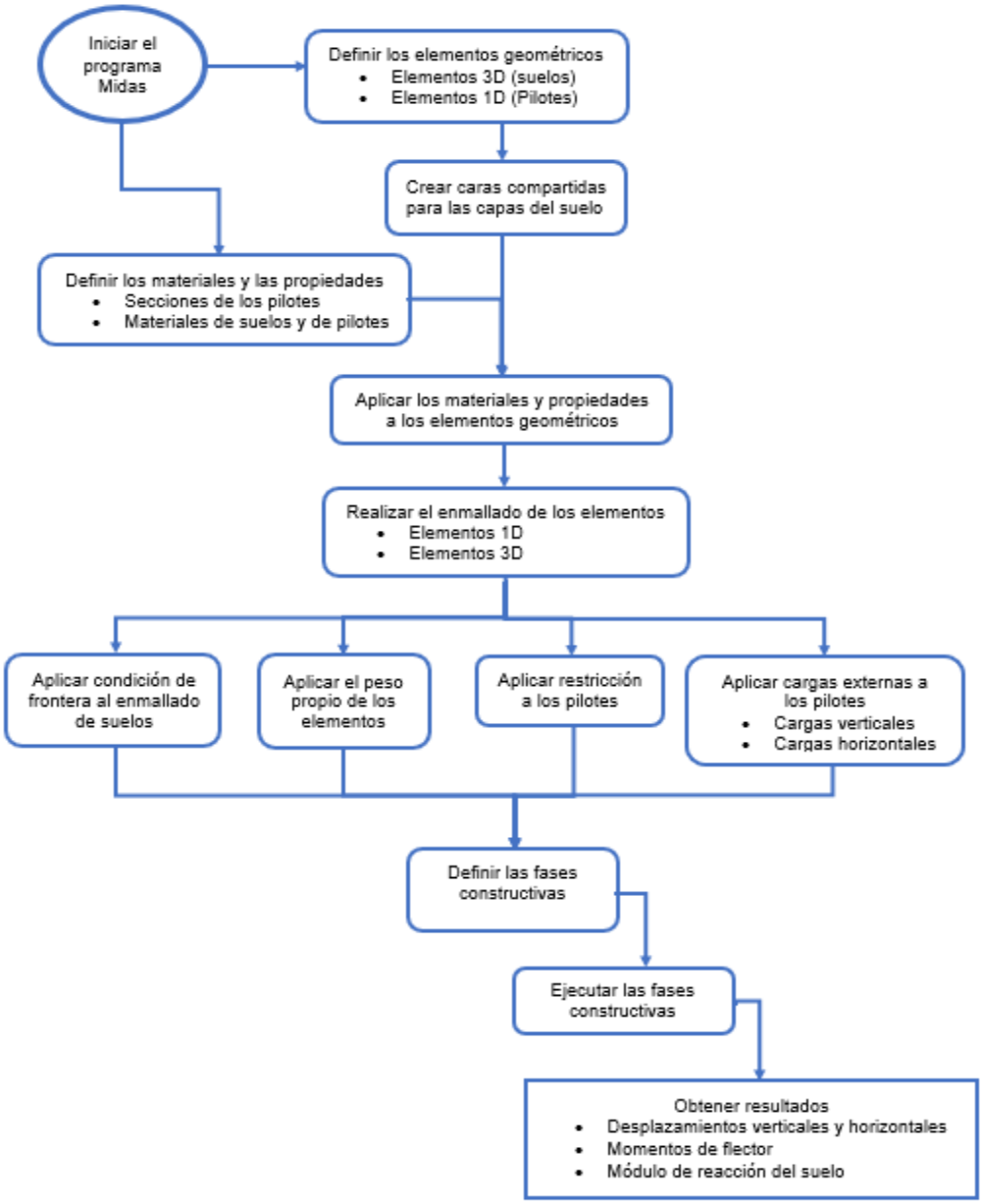


Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de modelación
Fuente: Elaboración propia

Geometría

El programa midas GTS NX permite, al inicio, crear figuras geométricas a partir de la sección *Geometry* en 2D o en 3D (espacio).

Para los modelos se procedieron a crear un área de 30x30 m para la superficie del suelo y luego extruirla a una profundidad de 80 m que corresponde al espesor total del perfil geotécnico promedio definido en el apartado 4.1.2. Como el perfil del suelo está compuesto por 6 capas, se dividieron el volumen creado en 6 unidades con sus respectivos espesores. Para realizar el enmallado de los pilotes se tiene que utilizar la herramienta enmallado 1D,

por lo que se tuvieron que crear líneas extruyendo puntos. La localización de estos puntos para la generación de las líneas depende del parámetro diámetro y del parámetro separación entre ejes de los pilotes mientras que la profundidad de extruido corresponde a longitud de los pilotes. En la Figura 27 se presentan los volúmenes que representan las capas del perfil de suelo y las líneas que definen los pilotes.

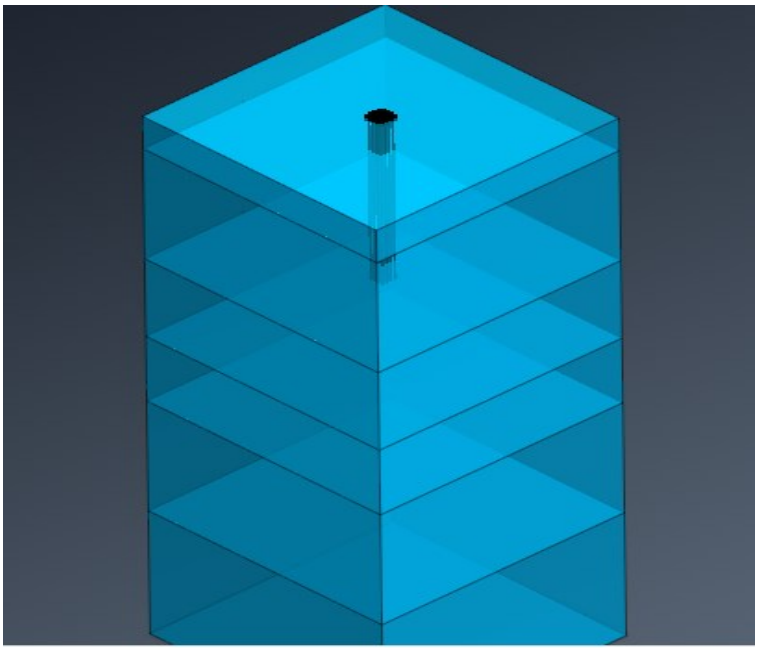


Figura 27. Creación de volúmenes y líneas para los modelos
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

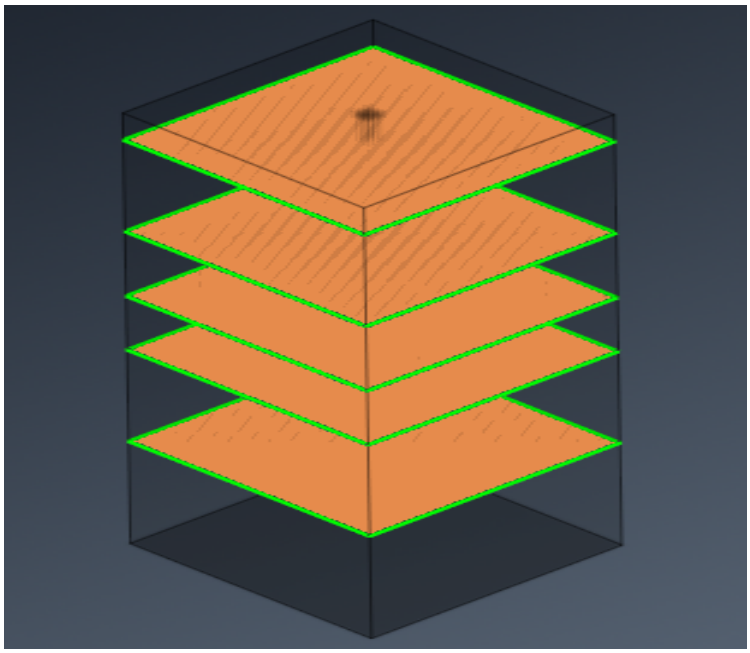


Figura 28. Caras compartidas de los volúmenes creados en el modelo
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

En el programa Midas GTS NX es necesario realizar un *Autoconnect* para crear caras compartidas de los objetos antes de realizar el enmallado de los elementos 3D (Ver Figura 28). Esta función facilita la operación de cruce entre sólidos.

Definición de materiales y propiedades

En el segundo apartado de menú del programa, *Mesh*, se permite definir la rigidez general y las propiedades no lineales del material del suelo y la estructura. Para el suelo, se pueden establecer propiedades de permeabilidad adicionales y condiciones de drenaje o no drenaje.

Para los modelos, se definieron materiales de tipo isotrópico de modelo *Mohr-Coulomb* para las capas del perfil geotécnico promedio (Ver Figura 29). Para los pilotes, se creó un material isotrópico de modelo *Elastic*. Luego se creó un material de tipo interfaz para los pilotes donde sus parámetros dependen de las cargas últimas de los pilotes y de los desplazamientos generados por las cargas. El modelo de comportamiento de interfaz se desarrolló para simular el comportamiento de límite (interfaz) entre materiales iguales o diferentes.

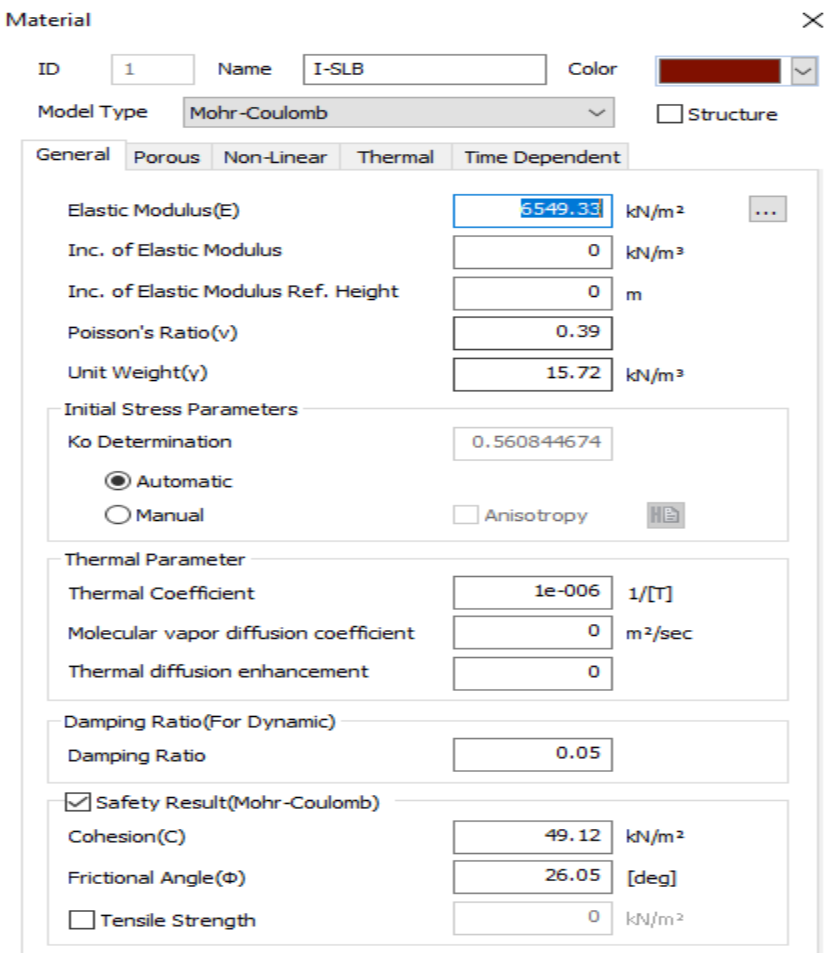


Figura 29. Creación de materiales en Midas GTS NX
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

Después de definir los materiales se procedió a definir las propiedades de los elementos estructurales (pilotes) y de los suelos. Esta función define la propiedad de cada conjunto de mallas cuando se genera una malla de suelo o estructura. Para suelo, determina qué material usar y para estructuras, agrega tamaño de sección, forma (rigidez) y espaciado horizontal, etc. Con la herramienta de *Properties* hay 4 tipos de propiedades *(1D, 2D, 3D y others)*. En los modelos se utilizó el tipo 1D para de definir las propiedades geométricas de la sección y el material de los pilotes (ver Figura 30), también fue utilizado para seleccionar el material de interfaz para los pilotes. El tipo 3D se utilizó para seleccionar el material de suelo para cada capa y el tipo *others* se utilizó para definir el comportamiento de interfaz en la punta de los pilotes.

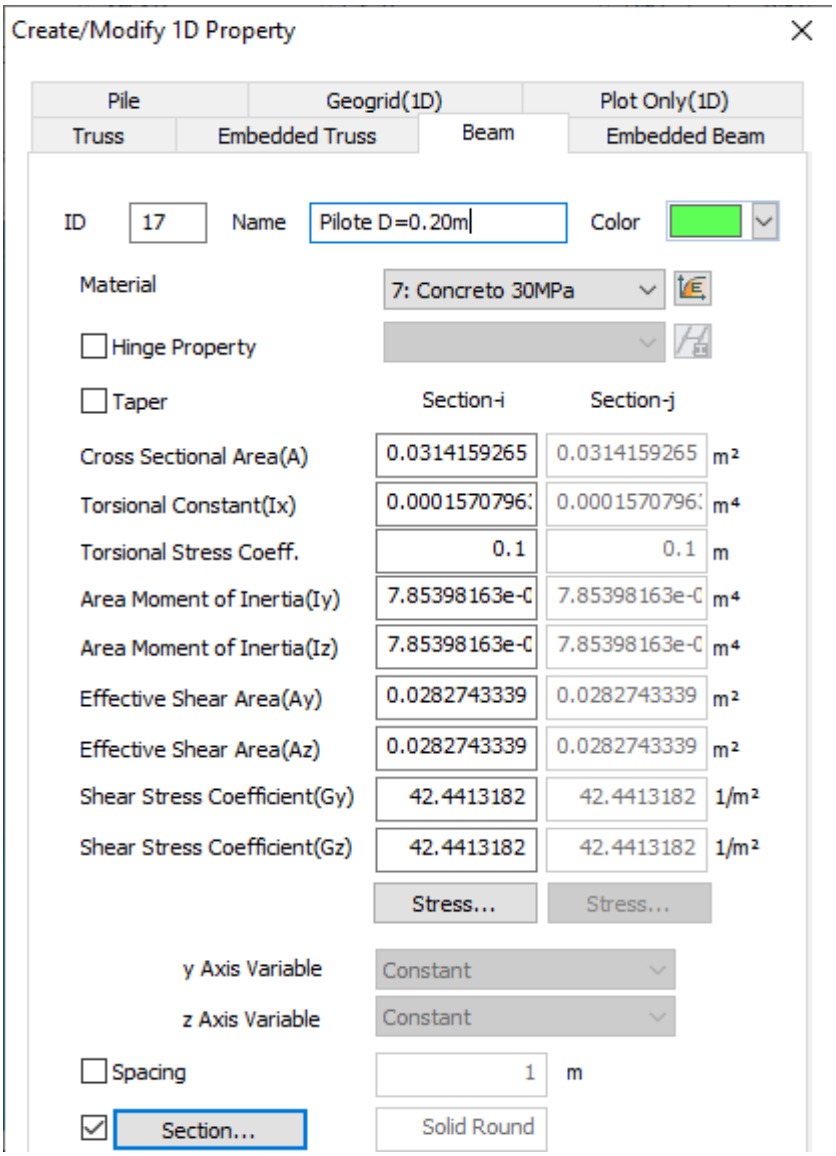


Figura 30. Creación de propiedad tipo 1D para los modelos
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

Enmallado de los elementos

En el menú *mesh* del programa, en el apartado llamado *Generate* está la opción que permite realizar el enmallado de los elementos de 1D, 2D y 3D.

Para los modelos de este estudio, solamente se aplicaron elementos de 1D y 3D. Para el enmallado de los elementos 3D, la forma de enmallado se puede seleccionar entre un tetraedro y un híbrido centrado en hexaedro (forma de combinación tetraédrica + hexaedro). Al realizar el enmallado de los elementos 3D, las capas de los suelos, se aplicó un tamaño de 3, la forma de tetraedro y las propiedades de suelo para cada capa (ver Figura 31). Para obtener resultados más rigurosos se aplica un tamaño de enmallado en la sección interior del modelo suelo (ver Figura 33).

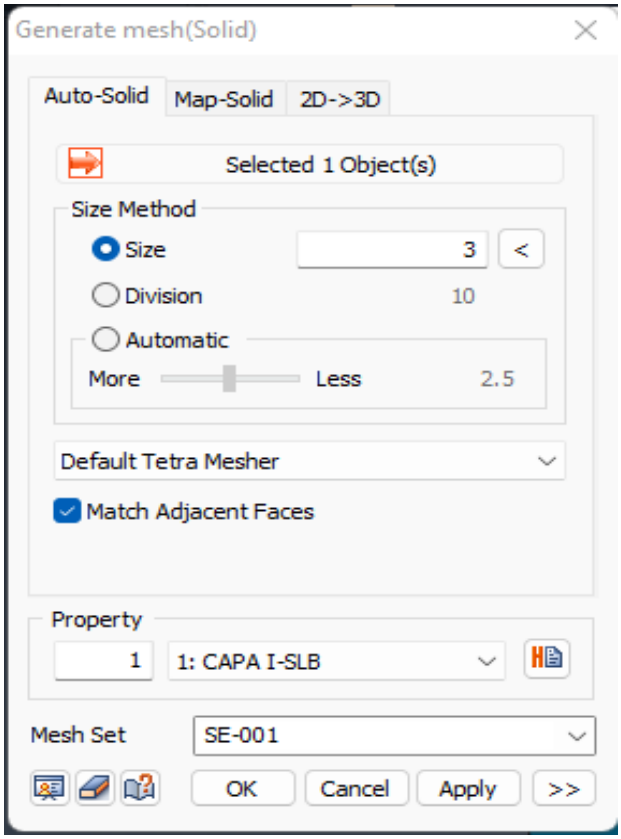


Figura 31. Realización de enmallado de suelos para los modelos
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

El enmallado de elementos 1D, se utiliza principalmente para generar elementos estructurales independientes que no requieren conexiones de nodo con elementos de tierra vecinos. En el caso de los pilotes, elementos de 1D, el enmallado se realizó definiendo el tamaño y aplicando las propiedades de los pilotes (ver Figura 32)

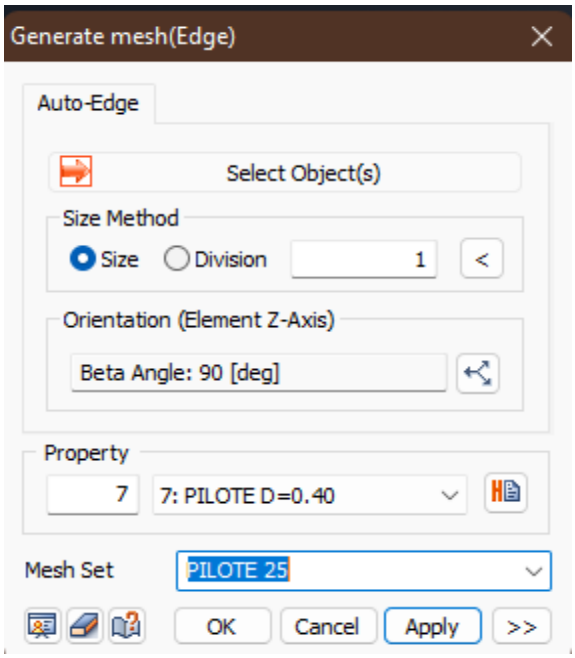


Figura 32. Realización de enmallado de pilotes para los modelos
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

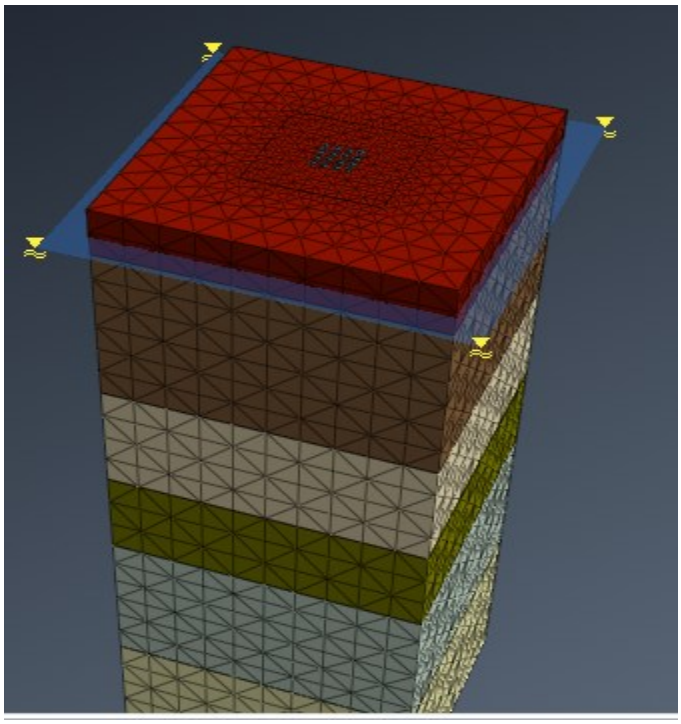


Figura 33. Enmallado de suelos y pilotes de los modelos
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

Aplicación de condición de frontera y cargas externas

Del menú principal, en el apartado *Static/Slope anlysis* se encuentra la opción *constraint* de la sección *Bondary* que permite aplicar diferentes tipos de condiciones de restricción a todos los elementos.

Para las condiciones de frontera del enmallado de los suelos, en el menú de *Constraint* viene la opción *Auto* que al ser aplicada se establecen automáticamente las condiciones para el análisis general de tensiones donde el desplazamiento en la dirección X está restringido para el lado izquierdo/derecho, el desplazamiento en la dirección Y está restringido para el lado frontal/trasero y el desplazamiento en la dirección X, Y está restringido para la parte inferior del modelo (ver Figura 34). Otra condición que fue aplicada, en este caso a los pilotes, es la restricción del eje Z para impedir que los pilotes giren en sus propios ejes longitudinales.

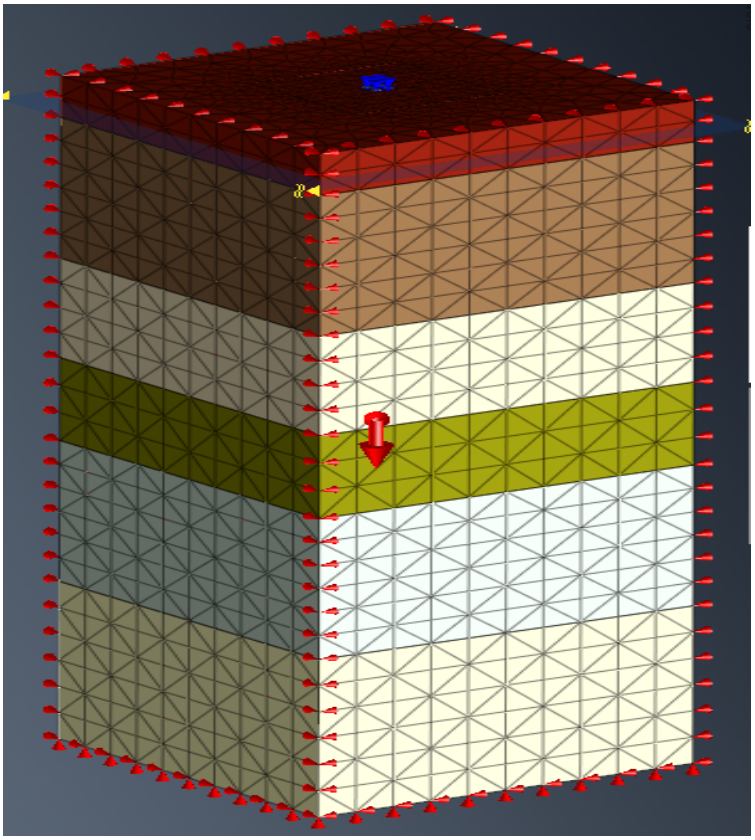


Figura 34. Aplicación de condición de frontera y peso propio a los modelos
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

Del mismo apartado anterior, en la sección *load* se encuentra la opción *Self wieght* que permite introducir el peso propio de los elementos incluidos en el modelo como cargas aplicadas. El peso propio calculado se puede aplicar en cada dirección GCS X, Y y Z como una fuerza de cuerpo para el análisis estático. El volumen, la densidad y la aceleración gravitatoria del elemento de entrada se utilizan para calcular automáticamente el peso propio incluido en el modelo de análisis. La dirección del peso propio de los modelos se

define mediante el vector unitario corresponde al eje Z y el valor predeterminado para la dirección gravitacional se establece en -1 (ver Figura 34).

La opción *Force* de la sección *load* permite aplicar la carga de Fuerza o Momento en un nodo de elemento donde la dirección se puede definir con referencia a un sistema de coordenadas arbitrario. Para los modelos se aplicaron cargas gravitacionales y laterales en la cabeza de los pilotes que se definen en las direcciones Z y Y respectivamente (ver Figura 35).

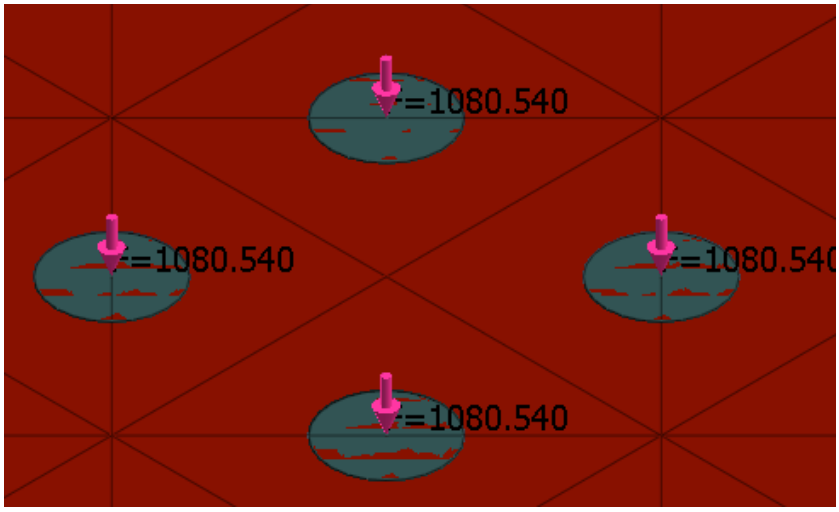


Figura 35. Cargas gravitacionales aplicadas a los pilotes
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

Análisis de fases constructivas

Después de realizar las fases anteriores, se realizó el análisis de fases constructivas. El análisis de la etapa de construcción se puede utilizar para simular el proceso de construcción del suelo mediante el análisis numérico. El análisis de fase constructiva consta de múltiples etapas y las condiciones de carga/límite, así como los elementos, se pueden agregar o eliminar en cada etapa. Este cambio de carga/límite o elemento se aplica al comienzo de cada etapa. El programa Midas GTS NX permite utilizar diferentes tipos de funciones de análisis para realizar el análisis de la etapa de construcción.

Para crear la fase constructiva, se entró en el apartado *"Static/Slope anlysis"* del menú principal, luego en la opción *Stage set* de la sección *Construction stage* del programa Midas GTS NX. Para este estudio se aplicó esfuerzo como tipo de fases de construcción y se definieron 3 fases. La primera fase, esfuerzo inicial del suelo, consistió en activar los enmallados de los suelos, las condiciones de frontera y activar el peso propio de los materiales. La segunda etapa fue activar los enmallados de los pilotes y las restricciones del eje Z de los pilotes y en la última fase se activaron las cargas externas (ver Figura 36). Por último, una vez que estén bien definidas las fases constructivas de los modelos, se pasaron a crear el caso de análisis *(Analysis set)* para realizar el análisis. Este paso establece el método de análisis y las condiciones de análisis (conjunto de malla, condición de límite, condición de carga, etc.) para cada método.

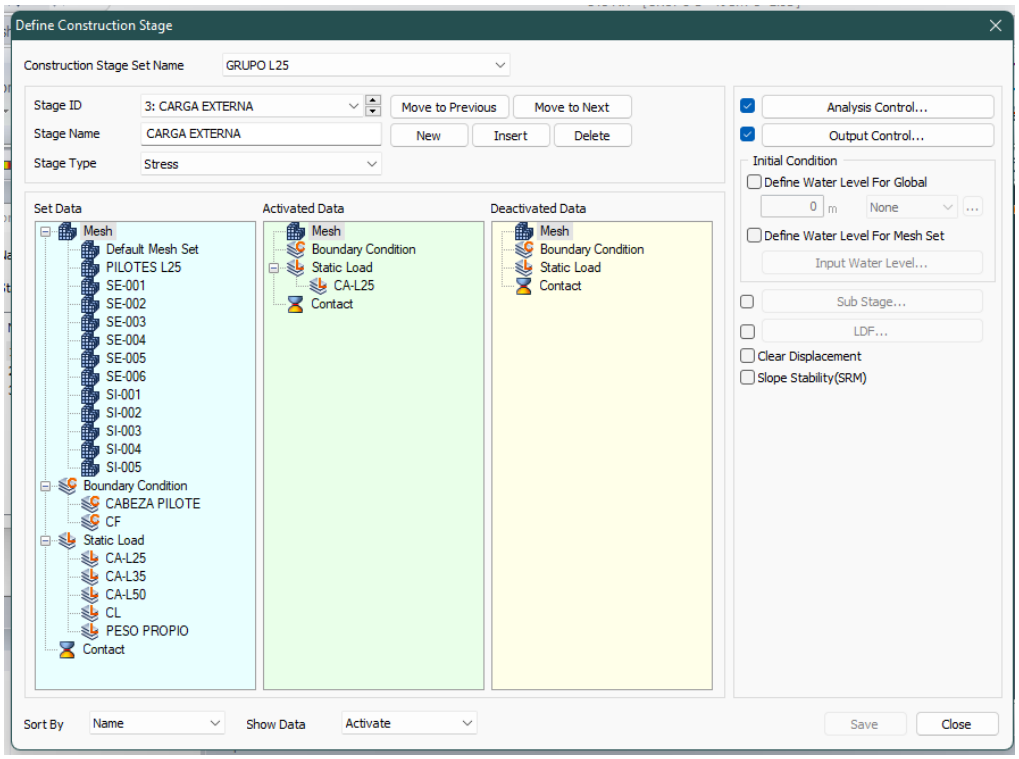


Figura 36. Fases constructivas de los modelos
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

Resultados

Una vez que el análisis haya finalizado con éxito, el programa carga automáticamente los resultados del análisis y permite realizar varias funciones, como la salida de gráficos, la salida de tablas, guardar el estado gráfico, etc.

A continuación, se presentan algunos resultados de desplazamiento verticales tanto laterales y de momentos flectores donde el programa permite visualizar la magnitud de ellos a partir de diagrama de colores. En la Figura 37, se puede apreciar los desplazamientos verticales, generados por cargas gravitacionales, en la parte superior de los pilotes y en los suelos alrededor y en la Figura 38, se puede ver los desplazamientos verticales generados a lo largo de la longitud de los pilotes y en los suelos alrededor de sus ejes. En la Figura 39, las leyendas de barras de colores muestran la magnitud de los desplazamientos laterales y los momentos flectores generados a lo largo de la longitud de los pilotes sometidos a cargas laterales.

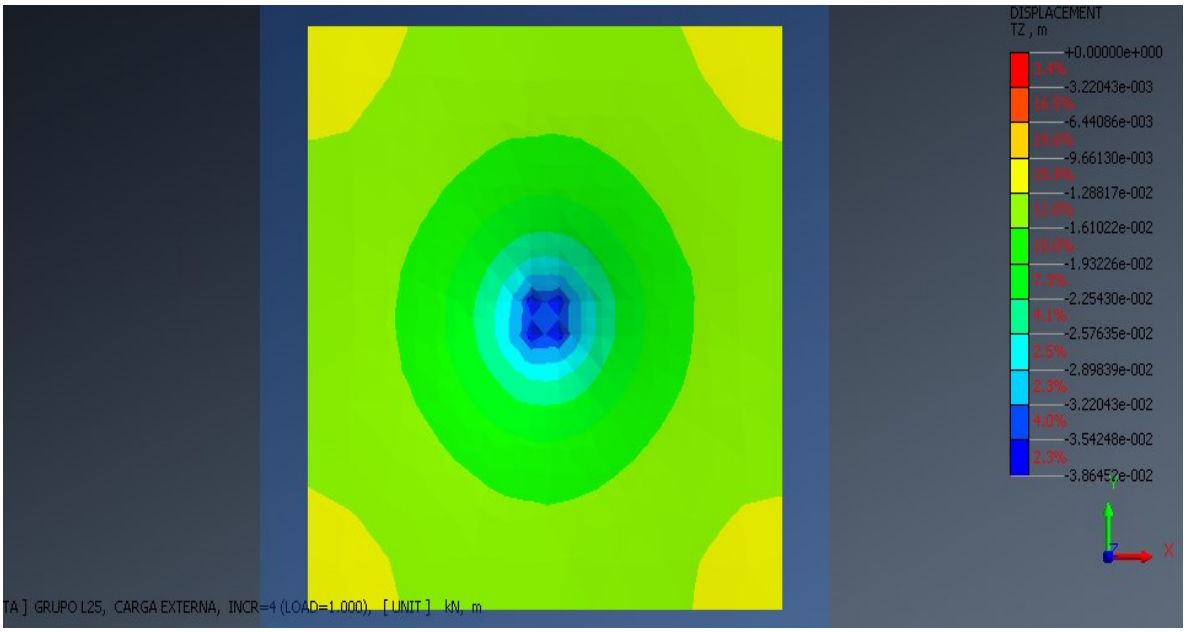


Figura 37. Resultados de desplazamientos verticales en la parte superior de los pilotes
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

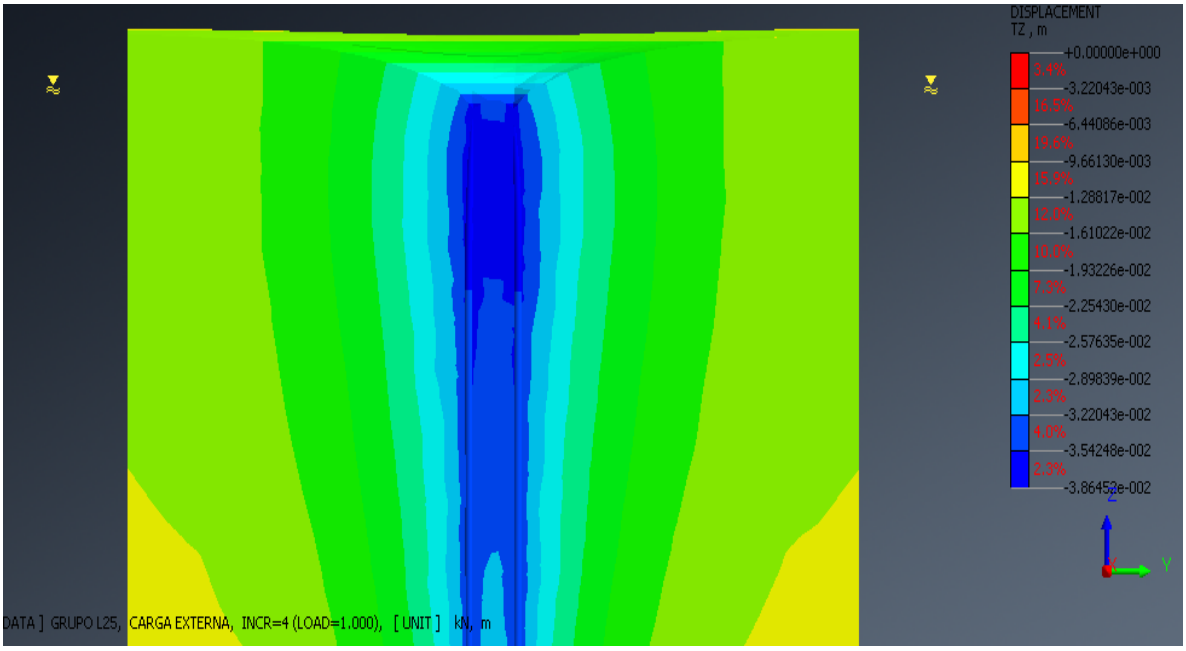


Figura 38. Resultados de desplazamientos verticales alrededor de los pilotes
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

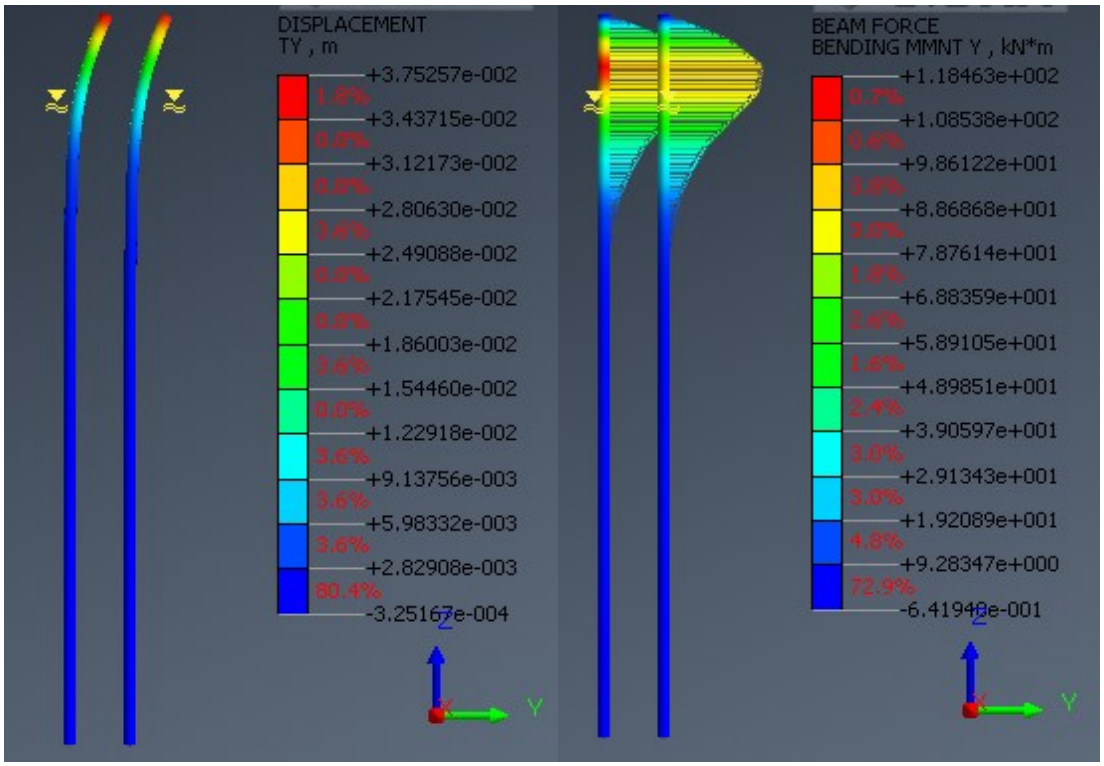
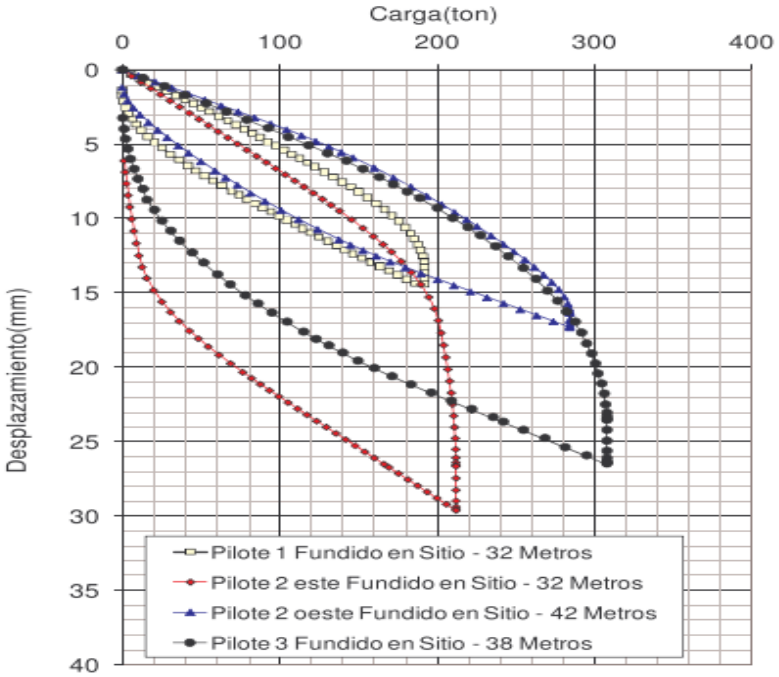


Figura 39. Resultados de desplazamientos lateral y momentos flectores en pilotes
Fuente: Elaboración propia en Midas GTS NX

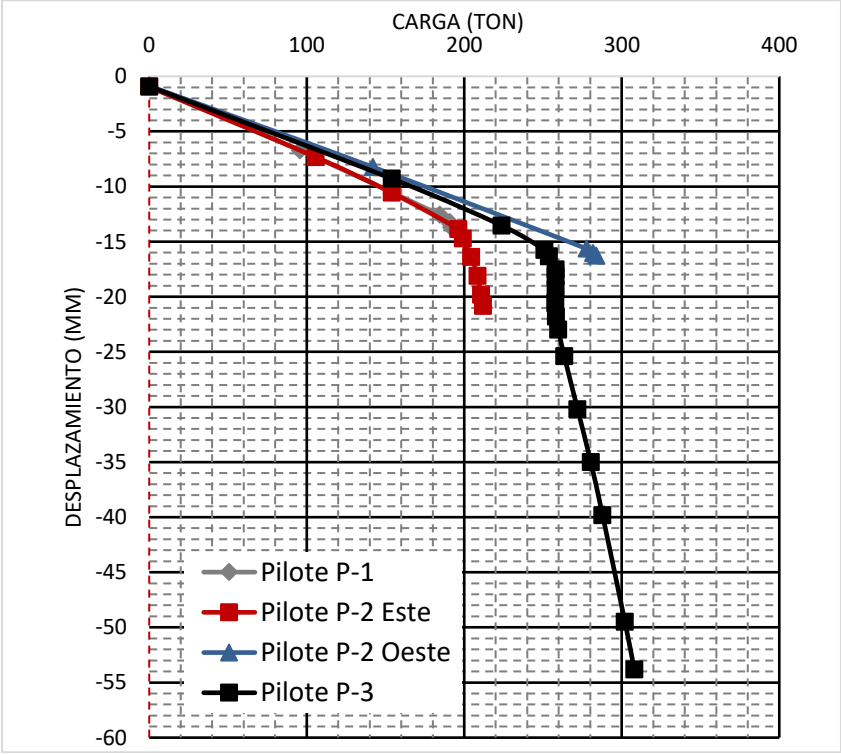
4.3.3 Validación de la metodología

Esta sección presenta una comparación de resultados de curvas de cargas versus deformaciones del trabajo de ensayos de pilotes individuales en los suelos lacustres de Bogotá realizado por Rodríguez & Velandia (2009) con resultados de curvas de cargas versus deformaciones de pilotes individuales modelados en Midas GTS NX aplicando la metodología presentada en la sección 4.3.2. Los pilotes modelados mediante el método de elementos finitos tienen las mismas propiedades mecánicas y geométricas que los pilotes aplicados en la prueba de campo y también son sometidos a las mismas cargas gravitacionales.

La Gráfica 2 muestra los resultados obtenidos en el campo por Rodríguez & Velandia (2009) y la Gráfica 3 presenta los resultados obtenidos a partir del método de elementos finitos en Midas GTS NX. En la Tabla 13 se muestran las propiedades geométricas de los pilotes, las cargas aplicadas y los asentamientos generados en el extremo superior de los pilotes para ambos casos.



Gráfica 2. Curvas de carga-desplazamiento de pilotes aislados de pruebas en campo
Fuente: (J. A. Rodríguez & Velandia, 2009)



Gráfica 3. Curvas de carga-desplazamiento de pilotes aislados en Midas GTS NX
Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Propiedades geométricas, cargas aplicadas y desplazamiento de los pilotes

Pilote	Diámetro (m)	Longitud efectiva (m)	Cargas aplicadas (Ton)	Desplazamiento (mm)	
				(J. A. Rodríguez & Velandia, 2009)	Midas GTS NX
1	0.60	32	192	14.50	13.76
2 este	0.60	32	212	29.50	20.84
2 oeste	0.60	42	284	17.50	16.27
3	0.60	38	308	26.50	53.83

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de desplazamiento vertical obtenidos se realizó un análisis de varianza donde los datos considerados son el desplazamiento generado por unidad de carga aplicada para ambos ensayos. El resultado del análisis mostró que no hay una diferencia significa entre la respuesta mecánica de los pilotes modelados en midas GTS NX y la respuesta mecánica de prueba de campo en cuestión con una probabilidad de 0.76.

4.3.4 Casos Considerados en la Simulación Numérica

Para el estudio de los comportamientos mecánicos de grupos de pilotes en los suelos arcillosos de lacustre de Bogotá se consideraron 4 parámetros. El primer parámetro, la configuración de grupo, está definido por el número de pilotes que contiene el grupo y la disposición de los pilotes. El parámetro configuración tiene 5 niveles: el primero es un grupo de 4 pilotes que forman un rectangular y está denominado RE_2x2 (Figura 40a); el segundo está formado por 8 pilotes que sus disposiciones forman un perímetro rectangular y se nombra RE_3x3 (Figura 40b); el tercero está definido por 9 pilotes que forman una cuadricular y se denomina CU_3x3 (Figura 40c); el cuarto, CIR_8P, es un grupo de 8 pilotes que forman un círculo por sus disposiciones (Figura 40d); el último es la configuración CIR_8P con un pilote colocado en el centro y éste se denomina CIR_9P (Figura 40e). Estas configuraciones fueron consideradas en el estudio con el objetivo de evaluar el efecto de la forma geométrica que forman los pilotes y el número de pilotes en la respuesta mecánica de los grupos de pilotes.

El segundo parámetro de estudio es el diámetro D de los pilotes, para éste se consideraron 3 valores que son 40, 60 y 80 cm. El tercero fue la longitud de pilote L donde se consideraron 6 valores de 25 a 50 m con un incremento de 5m para grupos sometidos a cargas gravitacionales y 3 valores de 25 a 45 m con un incremento de 10 m para los grupos sometidos a cargas laterales. El cuarto parámetro de estudio que fue usado en este estudio es la separación S entre pilotes donde se consideraron 3 niveles que son 3 D, 4 D y 5 D excepto para el grupo RE_2x2 sometidos a cargas gravitaciones que son 6 valores que van de 2.5 D a 5 D con un incremento de 0.5 D.

En los modelos de la simulación numérica, el extremo superior de los pilotes no se conecta con otro sistema (placa o cabezal) con el fin de focalizar el análisis en la respuesta geotécnica del sistema de pilotes.

En la Tabla 14, se presentan las combinaciones de parámetros utilizados para diferentes estados de cargas aplicadas en las simulaciones. Entre los parámetros geométricas y los estados de cargas externas se analizaron 567 combinaciones.

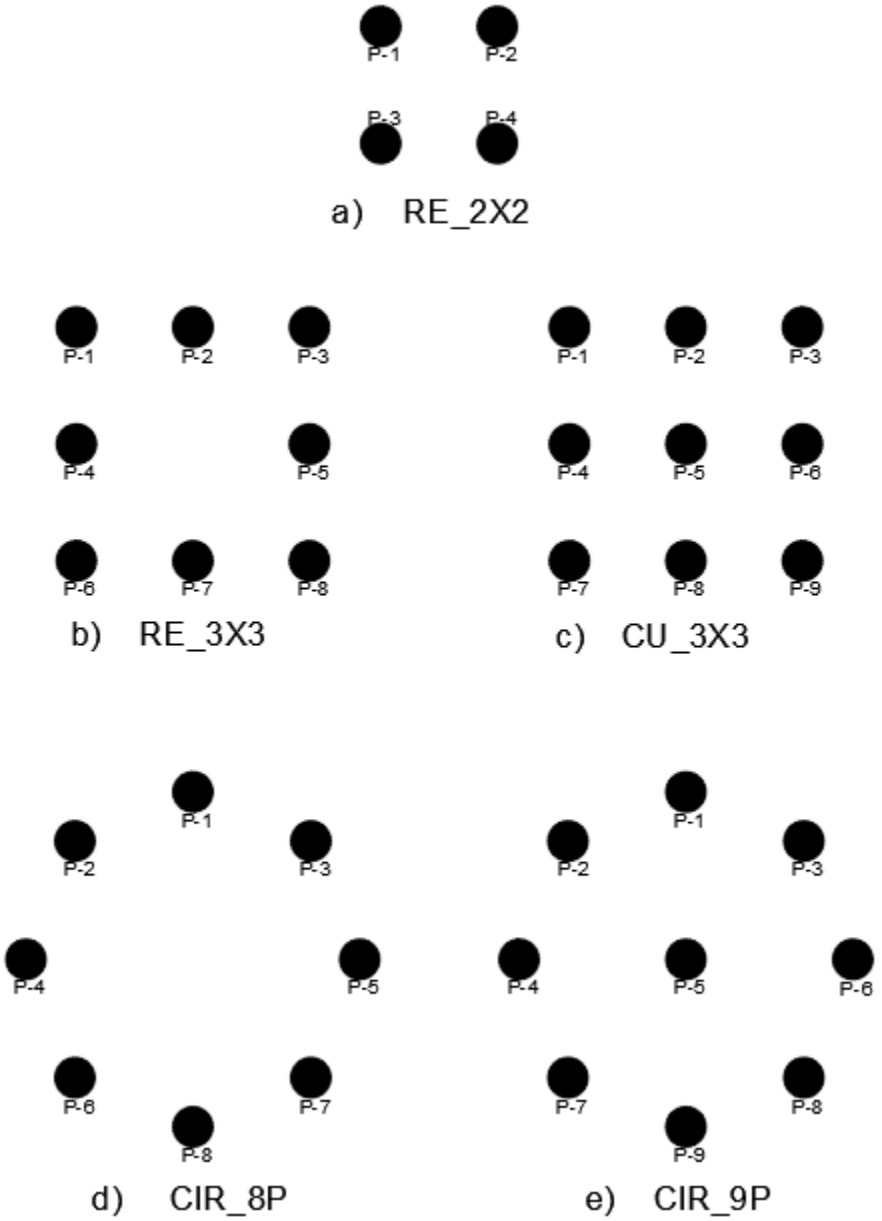


Figura 40. Configuración de grupo
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Modelos analizados

Cargas aplicadas	Configuración de grupo	Diámetro D de pilotes	Longitud L de pilotes	Separación S entre pilotes
Cargas axiales	RE_2x2	0.40, 0.60, 0.80m	25, 30, 35, 40, 45, 50m	2.5D, 3D, 3.5D, 4D, 4.5D, 5D
	RE_3x3 CU_3x3 CIR_8P CIR_9P	0.40, 0.60, 0.80m	25, 30, 35, 40, 45, 50m	3D, 4D, 5D
Carga lateral equivalente a 40% de capacidad de carga última	RE_2x2 RE_3x3 CU_3x3 CIR_8P CIR_9P	0.40, 0.60, 0.80m	25, 35, 45m	3D, 4D, 5D
Cargas laterales de 200KN y de 800KN	RE_2x2	0.40, 0.60, 0.80m	25, 35, 45m	3D, 4D, 5D
Combinación de cargas axiales con cargas laterales de 200KN y de 800KN	RE_2x3	0.40, 0.60, 0.80m	25, 35, 45m	3D, 4D, 5D

Fuente: Elaboración propia

4.4 SINTESIS

En este capítulo, se recopilaron datos de propiedades geotécnicas de los suelos arcillosos ubicados en el depósito lacustre de Bogotá a partir de fuentes segundarias. Con los datos recopilados, se generó un perfil geotécnico representativo de los suelos arcillosos de la sabana de Bogotá donde éste está dividido en 6 capas en las cuales se encuentran generalmente arcillas de baja capacidad y de alta compresibilidad. A partir del perfil geotécnico realizado, se determinaron las cargas aplicadas a los pilotes donde las cargas gravitacionales son la capacidad de cargas últimas de los pilotes y las cargas laterales son 40 % de ella.

Por otra parte, se presentó la metodología usada en el software Midas GTS NX para llevar a cabo el análisis de los modelos de simulación numérica. Las diferentes fases de la modelación numérica son: elaboración de la geometría, definición de los materiales y sus propiedades, enmallado de los elementos, aplicación de condición de fronteras y cargas externas, análisis de fases constructivas y, por último, la obtención de los resultados. Los diferentes parámetros de estudio definidos en la simulación numérica son: la configuración de grupos, la separación entre pilotes, el diámetro y la longitud de los pilotes.

5. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE GRUPOS DE PILOTES EN LAS ARCILLAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ

En este capítulo, se presentan los resultados de respuesta mecánica de los grupos de pilotes modelados en el perfil geotécnico representativo de los suelos lacustres mediante el método de elementos finitos en el programa Midas GTS NX. En primer lugar, se presentan la eficiencia de los grupos de pilotes sometidos a cargas gravitacionales y gráficas de curvas de carga versus desplazamiento vertical de pilotes. Luego, se presentan el desplazamiento lateral promedio de los grupos de pilotes sometidos a cargas laterales, curvas de desplazamiento lateral y de momento flector versus longitud de pilote, y módulo de reacción del suelo presentando a lo largo del eje de los pilotes. En tercer lugar, se encuentran el desplazamiento lateral promedio de los grupos de pilotes sometidos a combinaciones de cargas y curvas de desplazamiento lateral de pilotes. Por último, se presenta el análisis de influencia de los parámetros de estudio en los resultados de las simulaciones.

5.1 GRUPOS DE PILOTES BAJO CARGAS VERTICALES

A continuación, se presentan los resultados de capacidad de cargas últimas de algunos pilotes dentro de los grupos y de los grupos, también se presentan la eficiencia de los grupos de pilotes. Además, se presentan curvas de cargas versus desplazamientos de los grupos de pilotes obtenidos a partir de la modelación en midas GTS NX.

La obtención de la carga última de los pilotes dentro de los grupos se determina a partir de la intersección de las tangentes de las dos partes de la curva de cargas versus desplazamiento vertical de los pilotes. La carga última es el valor de la abscisa de la intersección (Ver sección 3.2.2). La eficiencia de un grupo de pilotes se obtiene dividiendo la capacidad de carga última del grupo entre el producto del número de pilote que contiene el grupo por la capacidad de carga última del pilote aislado considerando las mismas propiedades geométricas (ver la ecuación (Ec. 12)). La capacidad de carga última de cada pilote aislado se encuentra en la Tabla 12.

5.1.1 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2

Para los grupos de pilotes RE_2x2, se consideran la carga última de dos pilotes de cada grupo para determinar la capacidad de carga última de los grupos. La carga última de los grupos es igual a dos veces de la suma de la carga última de los dos pilotes considerados.

Grupos de pilotes RE_2x2 con diámetro D=0.40 m

En la Tabla 15, se presentan la carga última de los pilotes P-1 y P-4 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50m y de separaciones 2.5D, 3D, 3.5D, 4D, 4.5D y 5D. La Gráfica 4 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-1 de longitud L=25 m

y de separaciones 2.5D, 3D, 3.5D, 4D, 4.5D y 5D. La Tabla 16 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 6 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 15. Carga última (KN) de P-1, P-4 y de RE_2x2 para D=0.40 m

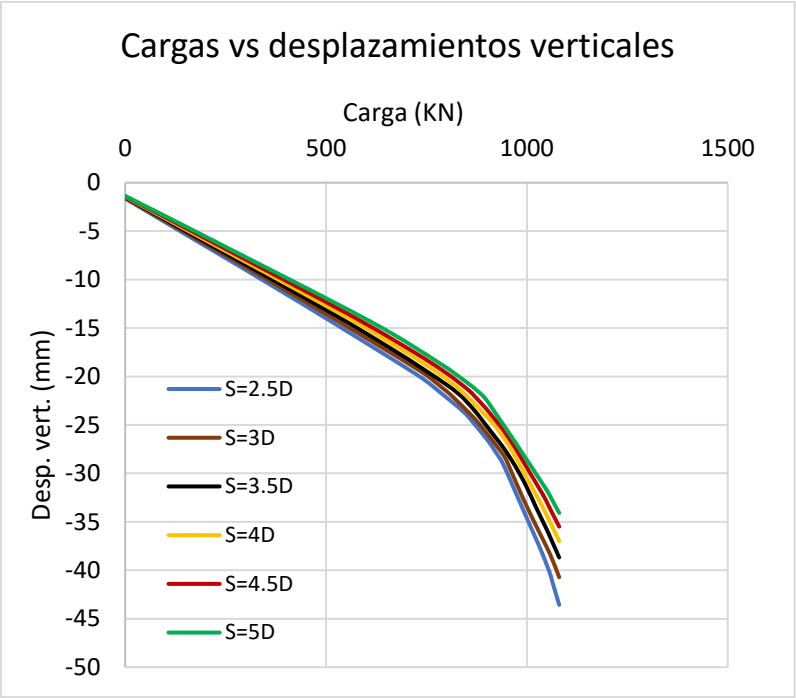
Pilote	S=2.5D			S=3D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	838.68	847.13	3371.63	871.32	867.14	3476.94
L30	1092.99	1097.69	4381.38	1127.62	1116.47	4488.19
L35	1312.33	1320.04	5264.74	1335.59	1345.80	5362.78
L40	1614.15	1620.38	6469.07	1625.84	1634.82	6521.31
L45	1938.33	1944.55	7765.75	1966.31	1976.00	7884.62
L50	2242.74	2235.32	8956.12	2267.32	2257.88	9050.40
Pilote	S=3.5D			S=4D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	892.14	882.01	3548.30	907.21	893.39	3601.20
L30	1148.19	1132.04	4560.46	1148.16	1133.28	4562.87
L35	1350.33	1364.17	5428.99	1373.78	1387.90	5523.36
L40	1648.85	1658.69	6615.08	1665.04	1683.05	6696.17
L45	1992.11	1999.98	7984.17	2027.00	2025.00	8104.00
L50	2295.09	2306.40	9202.98	2301.72	2320.07	9243.59
Pilote	S=4.5D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	919.99	906.64	3653.25	931.36	918.05	3698.82
L30	1168.37	1158.44	4653.62	1173.02	1171.67	4689.37
L35	1377.34	1391.05	5536.78	1399.25	1410.66	5619.81
L40	1680.13	1694.74	6749.73	1708.63	1716.69	6850.64
L45	2019.99	2026.39	8092.77	2036.55	2036.14	8145.39
L50	2319.81	2330.34	9300.31	2352.87	2354.25	9414.23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Eficiencia de grupos RE_2X2 para D=0.40 m

Pilote	S=2.5D	S=3D	S=3.5D	S=4D	S=4.5D	S=5D
L25	0.78	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86
L30	0.85	0.87	0.88	0.88	0.90	0.90
L35	0.86	0.87	0.88	0.90	0.90	0.91
L40	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94
L45	0.92	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97
L50	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_2x2_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes RE_2x2 con diámetro D=0.60 m

Para los grupos de pilotes de diámetro D=0.60m, se presentan la carga última de los pilotes P-1 y P-4 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 2.5D, 3D, 3.5D, 4D, 4.5D y 5D en la Tabla 18. La Gráfica 5 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-1 de longitud L=25 m y de separaciones 2.5D, 3D, 3.5D, 4D, 4.5D y 5D. En la Tabla 17, se presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 6 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 17. Eficiencia de grupos RE_2X2 para D=0.60 m

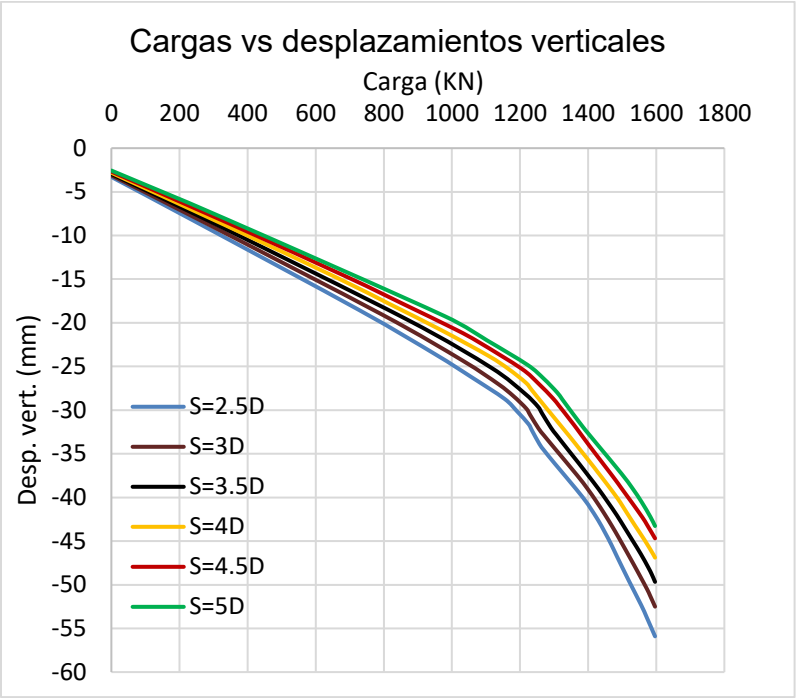
Pilote	S=2.5D	S=3D	S=3.5D	S=4D	S=4.5D	S=5D
L25	0.79	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86
L30	0.83	0.84	0.86	0.87	0.87	0.88
L35	0.85	0.87	0.88	0.89	0.90	0.90
L40	0.87	0.88	0.90	0.91	0.91	0.92
L45	0.90	0.92	0.93	0.93	0.94	0.94
L50	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Carga última (KN) de P-1, P-4 y de RE_2x2 para D=0.60 m

Pilote	S=2.5D			S=3D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	1267.34	1267.32	5069.31	1299.04	1306.18	5210.44
L30	1593.77	1584.56	6356.65	1613.94	1604.34	6436.56
L35	1930.43	1930.94	7722.74	1967.71	1966.59	7868.59
L40	2320.29	2324.01	9288.61	2359.51	2368.40	9455.83
L45	2793.95	2794.86	11177.62	2834.60	2841.77	11352.75
L50	3246.58	3238.34	12969.85	3291.70	3290.19	13163.77
Pilote	S=3.5D			S=4D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	1322.53	1328.99	5303.05	1347.48	1348.17	5391.30
L30	1642.84	1635.38	6556.44	1665.00	1651.45	6632.89
L35	2004.00	2000.04	8008.08	2026.03	2015.61	8083.29
L40	2400.57	2401.09	9603.34	2431.34	2424.38	9711.45
L45	2877.03	2872.97	11500.00	2896.78	2886.51	11566.59
L50	3327.43	3325.01	13304.86	3339.10	3351.25	13380.70
Pilote	S=4.5D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	1363.91	1362.32	5452.47	1369.58	1373.37	5485.91
L30	1670.82	1658.70	6659.03	1676.17	1675.35	6703.04
L35	2042.45	2027.36	8139.63	2047.03	2040.52	8175.09
L40	2451.24	2440.62	9783.71	2461.99	2453.10	9830.19
L45	2919.61	2903.53	11646.28	2922.83	2919.67	11685.00
L50	3355.55	3372.19	13455.48	3369.32	3385.61	13509.86

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 5. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_2x2_D60_L25
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes RE_2x2 con diámetro D=0.80 m

Para los grupos de pilotes de diámetro D=0.80 m, se presentan la carga última de los pilotes P-1 y P-4 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 2.5D, 3D, 3.5D, 4D, 4.5D y 5D en la Tabla 20. La Gráfica 6 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-1 de longitud L=30 m y de separaciones 2.5D, 3D, 3.5D, 4D, 4.5D y 5D. La Tabla 19 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 6 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 19. Eficiencia de grupos RE_2X2 para D=0.80 m

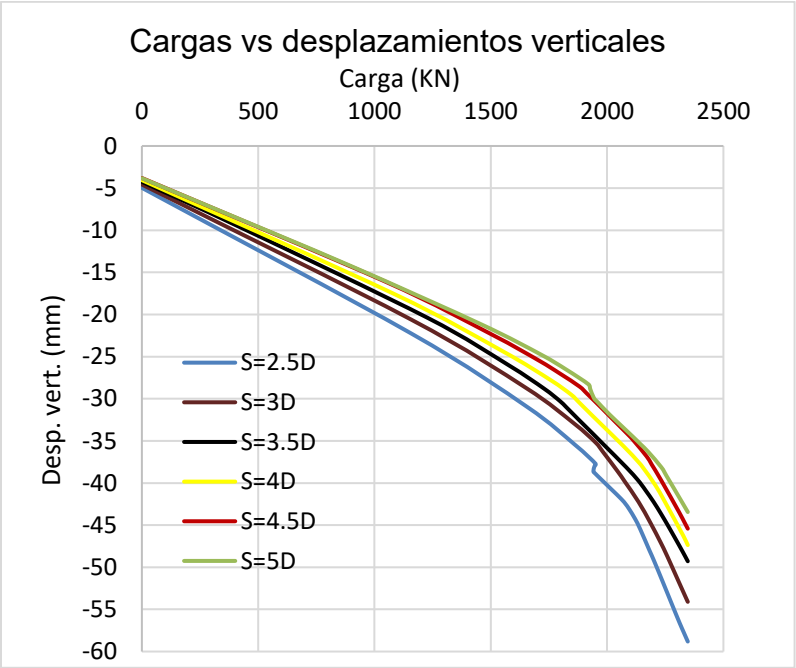
Pilote	S=2.5D	S=3D	S=3.5D	S=4D	S=4.5D	S=5D
L25	0.78	0.79	0.79	0.82	0.84	0.84
L30	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85
L35	0.83	0.85	0.85	0.86	0.87	0.88
L40	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.92
L45	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.94
L50	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Carga última (KN) de P-1, P-4 y de RE_2x2 para D=0.80 m

Pilote	S=2.5D			S=3D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	1625.44	1656.77	6564.41	1668.02	1661.41	6658.86
L30	1978.45	2004.65	7966.20	2020.18	2034.00	8108.37
L35	2469.71	2473.27	9885.95	2525.69	2504.95	10061.29
L40	3066.10	3081.45	12295.11	3116.46	3114.73	12462.39
L45	3644.58	3649.77	14588.72	3697.90	3686.07	14767.94
L50	4190.64	4199.14	16779.57	4260.76	4247.65	17016.84
Pilote	S=3.5D			S=4D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	1672.63	1643.20	6631.66	1736.65	1720.62	6914.54
L30	2063.44	2031.40	8189.68	2083.75	2078.72	8324.93
L35	2551.28	2520.13	10142.81	2571.00	2552.77	10247.54
L40	3160.90	3129.51	12580.80	3196.23	3191.45	12775.35
L45	3744.70	3707.32	14904.03	3772.10	3761.37	15066.94
L25	4302.83	4249.95	17105.56	4330.95	4324.00	17309.90
Pilote	S=4.5D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	1737.75	1766.52	7008.55	1759.42	1766.44	7051.72
L30	2087.98	2095.51	8366.99	2116.66	2121.60	8476.52
L35	2589.67	2579.41	10338.15	2601.67	2608.40	10420.14
L40	3218.08	3225.81	12887.77	3225.48	3238.09	12927.13
L45	3791.24	3788.71	15159.90	3798.40	3815.77	15228.34
L25	4368.29	4368.57	17473.72	4369.51	4379.74	17498.49

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 6. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_2x2_D80_L30
Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Grupos de pilotes rectangular RE_3x3

Entre los pilotes de los grupos RE_3x3, se consideran la carga última de los pilotes P-4 y P-8 (ver Figura 40b). La carga última de los grupos es igual a cuatro veces la suma de carga última de P-4 y P-8.

Grupos de pilotes RE_3x3 con diámetro D=0.40 m

En la Tabla 22, se presentan la carga última de los pilotes P-4 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 7 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-4 de longitud L=25 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 21 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 21. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.40 m

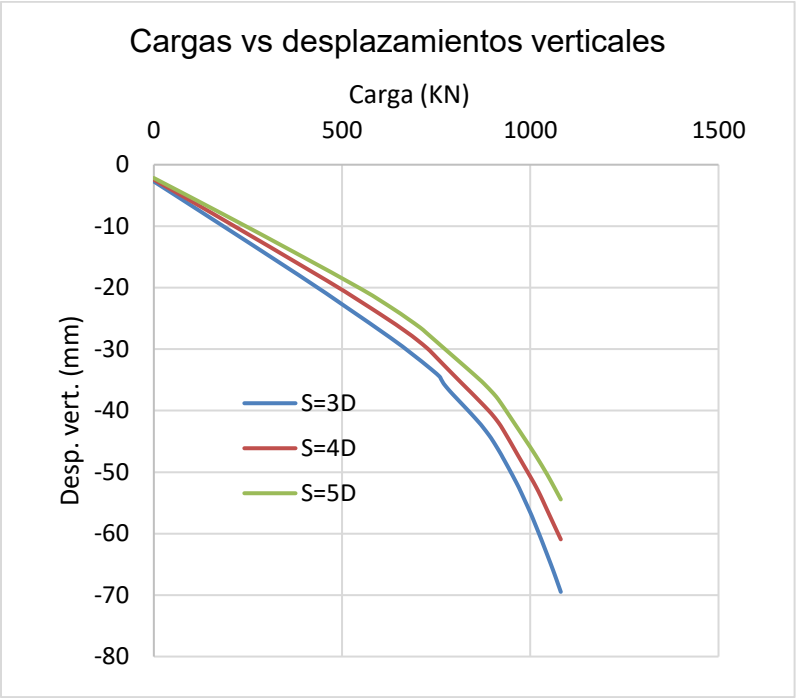
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.71	0.77	0.81
L30	0.75	0.80	0.84
L35	0.79	0.84	0.87
L40	0.84	0.88	0.90
L45	0.88	0.92	0.93
L50	0.91	0.93	0.95

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Carga última (KN) de P-4, P-8 y de RE_3x3 para D=0.40 m

	S=3D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	741.63	789.43	3062.12
L30	941.94	992.12	3868.13
L35	1194.03	1240.40	4868.87
L40	1501.47	1537.85	6078.64
L45	1832.36	1874.04	7412.81
L50	2153.96	2187.41	8682.73
	S=4D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	811.20	853.14	3328.68
L30	1015.38	1061.15	4153.08
L35	1262.69	1311.34	5148.06
L40	1566.55	1613.33	6359.77
L45	1900.31	1946.27	7693.17
L50	2214.98	2256.89	8943.75
	S=5D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	855.93	892.32	3496.49
L30	1063.16	1102.86	4332.03
L35	1311.15	1353.14	5328.59
L40	1617.13	1656.89	6548.05
L45	1934.60	1972.74	7814.68
L50	2257.34	2288.25	9091.19

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 7. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_3x3_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes RE_3x3 con diámetro D=0.60 m

En la Tabla 24, se presentan la carga última de los pilotes P-4 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 8 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-4 de longitud L=35 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 23 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 23. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.60 m

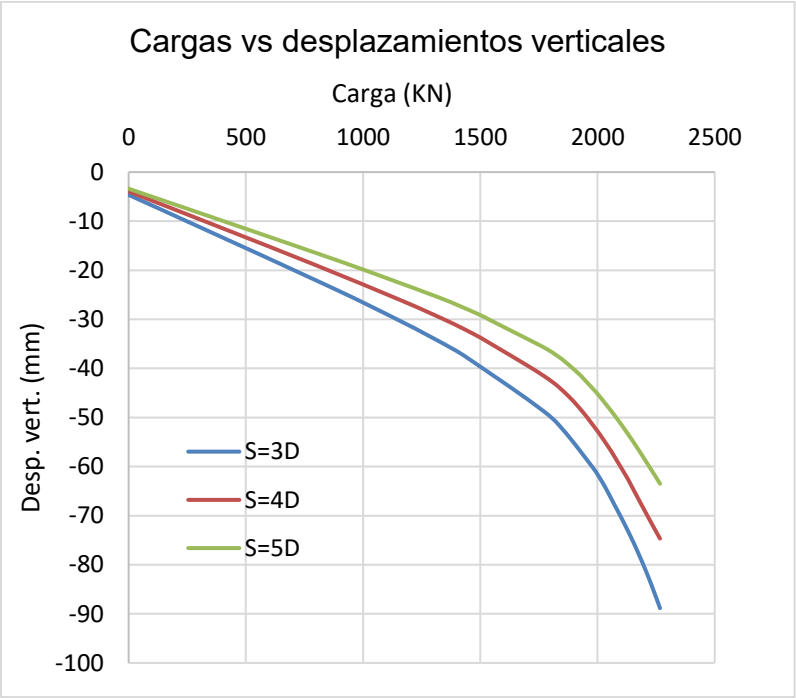
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.69	0.77	0.82
L30	0.78	0.82	0.86
L35	0.79	0.83	0.87
L40	0.83	0.87	0.90
L45	0.87	0.90	0.93
L50	0.89	0.92	0.94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Carga última (KN) de P-4, P-8 y de RE_3x3 para D=0.60 m

	S=3D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	1062.94	1151.09	4428.07
L30	1411.74	1467.24	5757.96
L35	1745.67	1818.42	7128.19
L40	2181.01	2250.42	8862.86
L45	2662.23	2716.59	10757.64
L50	3113.57	3169.94	12567.02
	S=4D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	1192.92	1254.86	4895.54
L30	1499.71	1543.96	6087.34
L35	1864.56	1900.17	7529.45
L40	2308.09	2336.41	9289.00
L45	2766.37	2802.62	11137.99
L50	3218.41	3251.22	12939.25
	S=5D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	1289.18	1320.37	5219.10
L30	1575.95	1597.39	6346.66
L35	1949.29	1993.24	7885.07
L40	2391.00	2428.81	9639.60
L45	2836.82	2886.16	11445.95
L50	3291.71	3337.56	13258.54

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 8. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_3x3_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes RE_3x3 con diámetro D=0.80 m

En la Tabla 26, se presentan la carga última de los pilotes P-4 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 9 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-4 de longitud L=45m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 25 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 25. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.80m

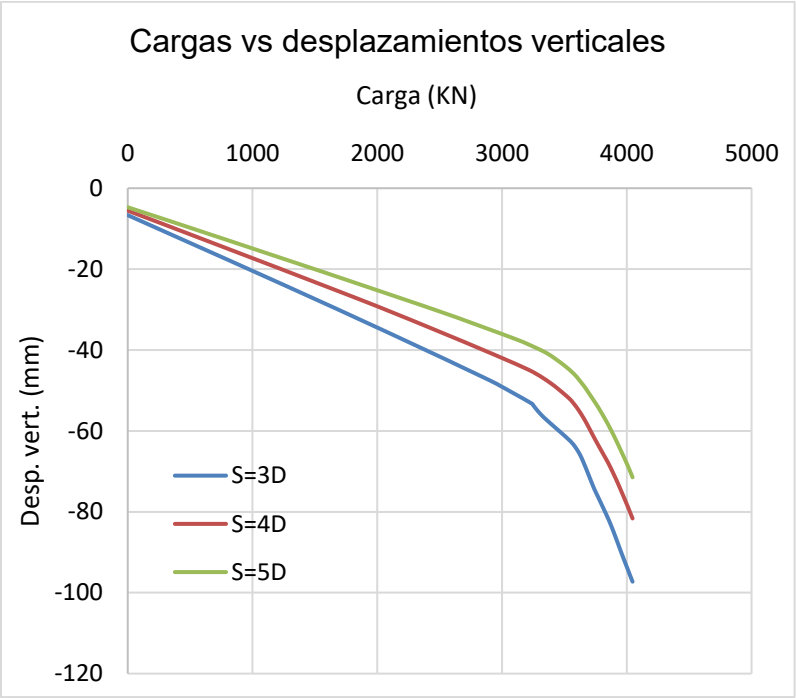
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.65	0.74	0.83
L30	0.80	0.86	0.88
L35	0.84	0.87	0.90
L40	0.85	0.89	0.91
L45	0.87	0.90	0.92
L50	0.90	0.92	0.94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Carga última (KN) de P-4, P-8 y de RE_3x3 para D=0.80m

	S=3D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	1295.53	1443.88	5478.82
L30	1983.81	2032.84	8033.29
L35	2456.84	2517.63	9948.93
L40	2902.02	2972.55	11749.13
L45	3489.19	3566.34	14111.07
L50	4101.84	4173.48	16550.64
	S=4D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	1505.32	1597.32	6205.27
L30	2121.18	2158.52	8559.41
L35	2585.73	2608.85	10389.17
L40	3038.27	3070.57	12217.68
L45	3603.04	3652.51	14511.10
L50	4213.19	4251.76	16929.89
	S=5D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3
L25	1675.70	1801.28	6953.96
L30	2182.35	2221.50	8807.71
L35	2634.66	2696.77	10662.87
L40	3092.80	3162.62	12510.83
L45	3659.13	3757.53	14833.32
L50	4284.05	4354.99	17278.08

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 9. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De RE_3x3_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Grupos de pilotes cuadricular CU_3x3

Para los grupos de pilotes CU_3x3, se consideran la carga última de los pilotes P-4, P-5 y P-9 (ver Figura 40c) de cada grupo para determinar la capacidad de carga última de los grupos. La carga última de los grupos es la suma de la carga última del pilote centro (P-5) más 4 vece la suma de la carga última de los pilotes P-4 y P-9.

Grupos de pilotes CU_3x3 con diámetro D=0.40 m

En la Tabla 27, se presentan la carga última de los pilotes P-4, P-5 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 10 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-5 de longitud L=25 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 28 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 27. Carga última (KN) de P-5, P-4, P-9 y de CU_3x3 para D=0.40m

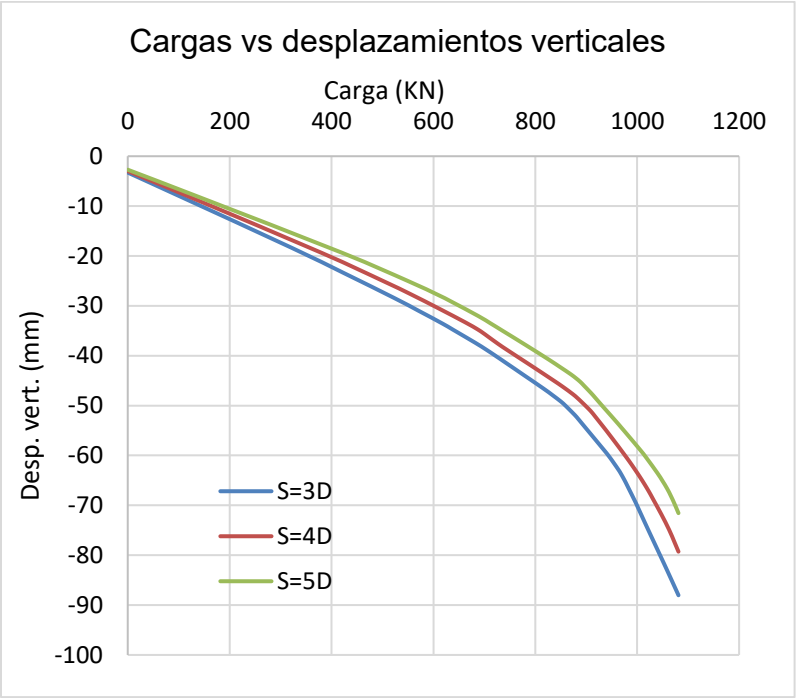
	S=3D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	611.14	693.09	749.54	6381.67
L30	910.67	949.21	994.41	8685.16
L35	1062.88	1141.63	1195.32	10410.67
L40	1349.55	1428.90	1475.93	12968.85
L45	1716.72	1783.76	1831.77	16178.85
L50	2041.18	2111.79	2140.82	19051.63
	S=4D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	779.50	810.61	835.48	7363.88
L30	906.57	968.90	1027.77	8893.25
L35	1157.40	1224.87	1281.81	11184.14
L40	1460.95	1526.16	1574.59	13863.93
L45	1798.60	1851.51	1913.37	16858.12
L50	2127.45	2185.26	2233.35	19801.88
	S=5D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	751.62	822.59	868.92	7517.66
L30	963.07	1021.82	1073.04	9342.50
L35	1205.54	1272.47	1327.21	11604.25
L40	1500.21	1567.20	1615.75	14231.99
L45	1846.35	1900.66	1950.13	17249.50
L50	2193.43	2234.64	2257.56	20162.23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Eficiencia de grupos CU_3x3 para D=0.40m

Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.66	0.76	0.77
L30	0.74	0.76	0.80
L35	0.75	0.81	0.84
L40	0.79	0.85	0.87
L45	0.86	0.89	0.91
L50	0.88	0.92	0.94

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 10. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CU_3x3_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes CU_3x3 con diámetro D=0.60 m

En la Tabla 30, se presentan la carga última de los pilotes P-4, P-5 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 11 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-5 de longitud L=35 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 29 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 29. Eficiencia de grupos CU_3x3 para D=0.60 m

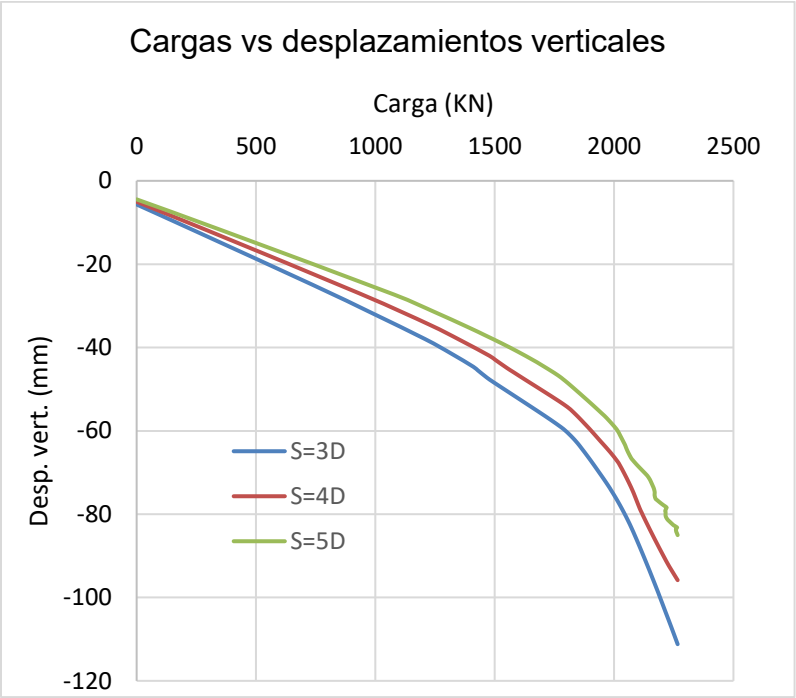
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.64	0.73	0.79
L30	0.73	0.79	0.83
L35	0.75	0.81	0.84
L40	0.79	0.84	0.88
L45	0.85	0.88	0.91
L50	0.88	0.90	0.91

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Carga última (KN) de P-5, P-4, P-9 y de CU_3x3 para D=0.60 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	880.77	976.72	1098.03	9179.75
L30	1219.35	1322.64	1401.74	12116.87
L35	1585.82	1678.08	1770.80	15381.33
L40	1993.58	2087.38	2178.33	19056.43
L45	2516.66	2599.79	2672.39	23605.40
L50	2992.39	3064.97	3137.60	27802.67
	S=4D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	1052.19	1136.49	1226.50	10504.15
L30	1359.62	1442.92	1499.97	13131.14
L35	1731.59	1817.59	1867.74	16472.89
L40	2155.37	2240.10	2285.95	20259.58
L45	2656.08	2723.27	2765.18	24609.88
L50	3077.19	3148.49	3196.48	28457.08
	S=5D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	1156.49	1242.30	1296.72	11312.61
L30	1449.15	1532.85	1567.75	13851.55
L35	1813.38	1894.03	1948.21	17182.33
L40	2257.41	2338.09	2390.18	21170.48
L45	2739.02	2805.52	2856.70	25387.91
L50	3171.29	3198.71	3220.08	28846.45

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 11. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CU_3x3_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes CU_3x3 con diámetro D=0.80 m

En la Tabla 32, se presentan la carga última de los pilotes P-4, P-5 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 12 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-5 de longitud L=45m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 31 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 31. Eficiencia de grupos CU_3x3 para D=0.80 m

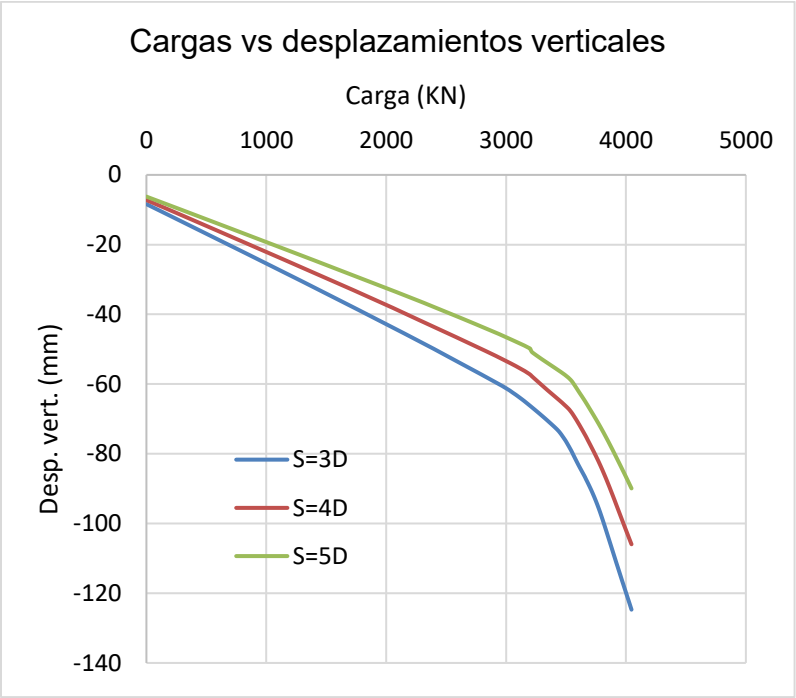
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.67	0.75	0.81
L30	0.75	0.81	0.85
L35	0.79	0.84	0.87
L40	0.82	0.86	0.89
L45	0.86	0.89	0.92
L50	0.88	0.90	0.93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Carga última (KN) de P-5, P-4, P-9 y de CU_3x3 para D=0.80 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	1229.03	1346.73	1483.32	12549.21
L30	1652.10	1729.24	1815.10	15829.46
L35	2116.94	2230.42	2303.80	20253.81
L40	2703.85	2812.03	2893.24	25524.92
L45	3289.68	3387.61	3507.21	30868.96
L50	3934.34	4019.76	4127.74	36524.34
	S=4D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	1452.50	1539.83	1624.98	14111.72
L30	1821.47	1891.96	1953.45	17203.10
L35	2271.86	2369.57	2411.14	21394.71
L40	2858.33	2951.59	2999.80	26663.89
L45	3450.94	3525.40	3604.35	31969.93
L50	4063.88	4129.61	4171.20	37267.12
	S=5D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	1580.92	1626.44	1766.24	15151.66
L30	1918.15	1987.42	2044.53	18045.97
L35	2394.94	2452.66	2528.89	22321.14
L40	2969.97	3030.37	3115.61	27553.88
L45	3581.77	3622.92	3727.20	32982.25
L50	4207.65	4243.18	4326.53	38486.50

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 12. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CU_3x3_D80_*L45*
Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Grupos de pilotes circular CIR_8P

Para los grupos de Pilotes CIR_8P, se consideran la carga última de los pilotes P-2 y P-7 (ver Figura 40d) y la carga última de estos grupos se determinan multiplicando la suma de la carga última de estos dos pilotes por cuatro.

Grupos de pilotes CIR_8P con diámetro D=0.40 m

En la Tabla 34, se presentan la carga última de los pilotes P-2 y P-7 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 13 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-2 de longitud L=25 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 33 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 33. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.40m

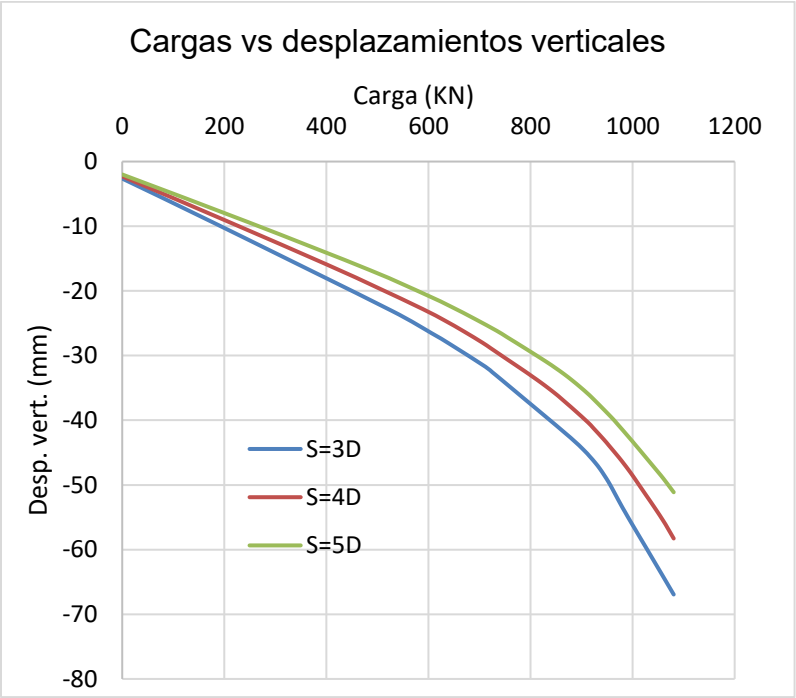
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.71	0.77	0.81
L30	0.75	0.81	0.85
L35	0.79	0.84	0.87
L40	0.84	0.88	0.91
L45	0.89	0.92	0.93
L50	0.91	0.93	0.96

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Carga última (KN) de P-2, P-7 y de CIR_8P para D=0.40m

	S=3D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	761.90	771.30	3066.40
L30	975.34	967.21	3885.11
L35	1210.87	1225.60	4872.93
L40	1524.89	1543.32	6136.42
L45	1853.10	1868.90	7443.99
L50	2167.90	2187.93	8711.66
	S=4D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	825.87	836.59	3324.93
L30	1048.73	1049.47	4196.40
L35	1295.68	1288.16	5167.67
L40	1612.81	1601.55	6428.73
L45	1931.02	1915.43	7692.91
L50	2242.94	2224.00	8933.88
	S=5D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	871.68	884.44	3512.24
L30	1095.82	1097.51	4386.64
L35	1336.64	1326.07	5325.41
L40	1653.15	1640.29	6586.88
L45	1964.19	1956.76	7841.89
L50	2303.38	2285.41	9177.58

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 13. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_8P_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes CIR_8P con diámetro D=0.60 m

En la Tabla 36, se presentan la carga última de los pilotes P-2 y P-7 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 14 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-2 de longitud L=35 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 35 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 35. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.60 m

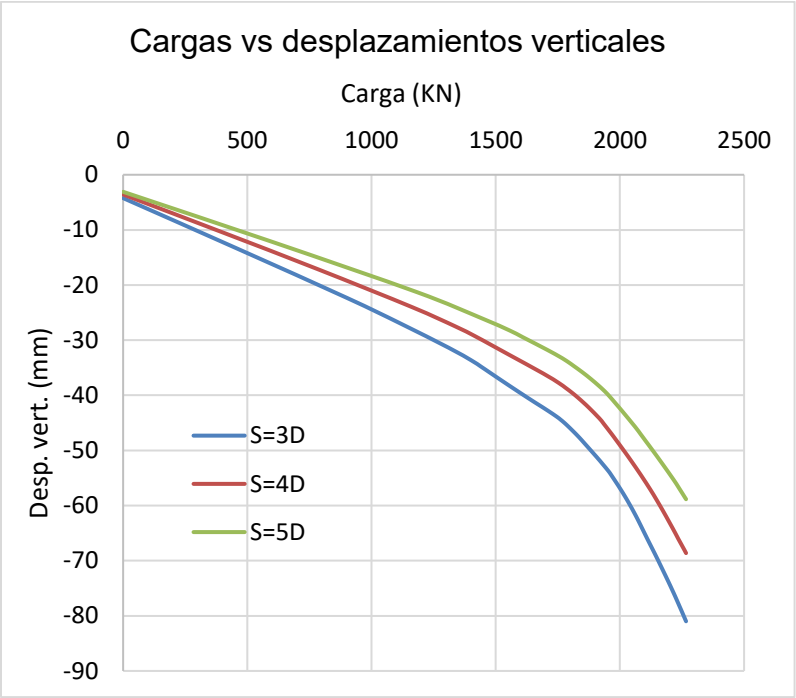
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.71	0.77	0.82
L30	0.75	0.81	0.85
L35	0.80	0.84	0.88
L40	0.84	0.88	0.90
L45	0.88	0.91	0.92
L50	0.90	0.89	0.94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Carga última (KN) de P-2, P-7 y de CIR_8P para D=0.60m

	S=3D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	1128.06	1135.82	4527.78
L30	1429.76	1448.98	5757.50
L35	1810.32	1816.39	7253.40
L40	2251.16	2247.52	8997.38
L45	2718.53	2712.08	10861.21
L50	3177.55	3172.11	12699.32
	S=4D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	1235.88	1235.99	4943.75
L30	1532.91	1541.06	6147.93
L35	1903.00	1915.03	7636.06
L40	2354.92	2347.60	9405.03
L45	2801.82	2797.45	11198.54
L50	3135.76	3140.53	12552.57
	S=5D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	1314.37	1309.22	5247.18
L30	1615.82	1617.99	6467.64
L35	1976.26	1990.44	7933.41
L40	2412.70	2406.67	9638.74
L45	2855.54	2844.77	11400.62
L50	3324.34	3311.62	13271.90

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 14. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_8P_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes CIR_8P con diámetro D=0.80 m

En la Tabla 38, se presentan la carga última de los pilotes P-2 y P-7 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 15 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-2 de longitud L=45 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 37 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 37. Eficiencia de grupos RE_3x3 para D=0.60 m

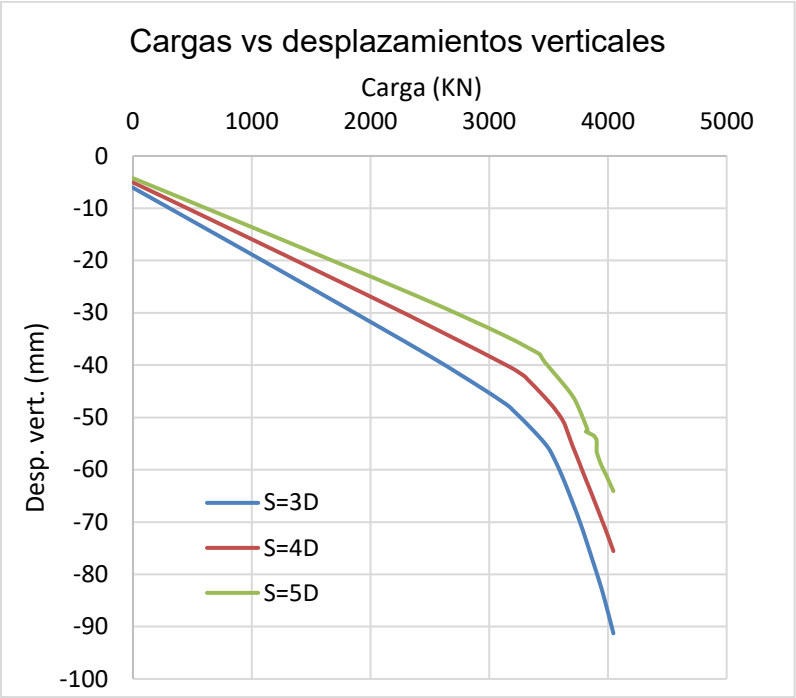
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.73	0.80	0.84
L30	0.82	0.86	0.89
L35	0.84	0.88	0.90
L40	0.86	0.89	0.91
L45	0.87	0.90	0.92
L50	0.89	0.92	0.93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Carga última (KN) de P-2, P-7 y de CIR_8P para D=0.80 m

	S=3D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	1558.62	1514.37	6145.97
L30	2030.95	2066.28	8194.45
L35	2489.48	2515.01	10008.98
L40	2946.15	2978.93	11850.15
L45	3516.34	3554.61	14141.90
L50	4166.38	4123.76	16580.29
	S=4D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	1673.09	1668.44	6683.05
L30	2159.65	2155.54	8630.38
L35	2594.03	2612.92	10413.92
L40	3057.31	3081.22	12277.08
L45	3639.32	3663.83	14606.30
L50	4269.79	4245.86	17031.31
	S=5D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P
L25	1780.00	1757.15	7074.30
L30	2212.00	2229.18	8882.36
L35	2662.57	2688.22	10701.57
L40	3140.02	3163.42	12606.87
L45	3717.18	3758.48	14951.30
L50	4344.18	4306.84	17302.04

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 15. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_8P_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.1.5 Grupos de pilotes circular CIR_9P

Para los grupos de pilotes CIR_9P, se consideran la carga última de los pilotes P-2, P-5 y P-8 (ver Figura 40e) de cada grupo. Para determinar la capacidad de carga última de los grupos se considera la carga última del pilote centro (P-5) más 4 veces la suma de la carga última de los pilotes P-2 y P-8.

Grupos de pilotes CIR_9P con diámetro D=0.40 m

En la Tabla 39, se presentan la carga última de los pilotes P-2, P-5 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 16 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-5 de longitud L=25 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 40 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 39. Carga última (KN) de P-5, P-2, P-8 y de CIR_9P para D=0.40 m

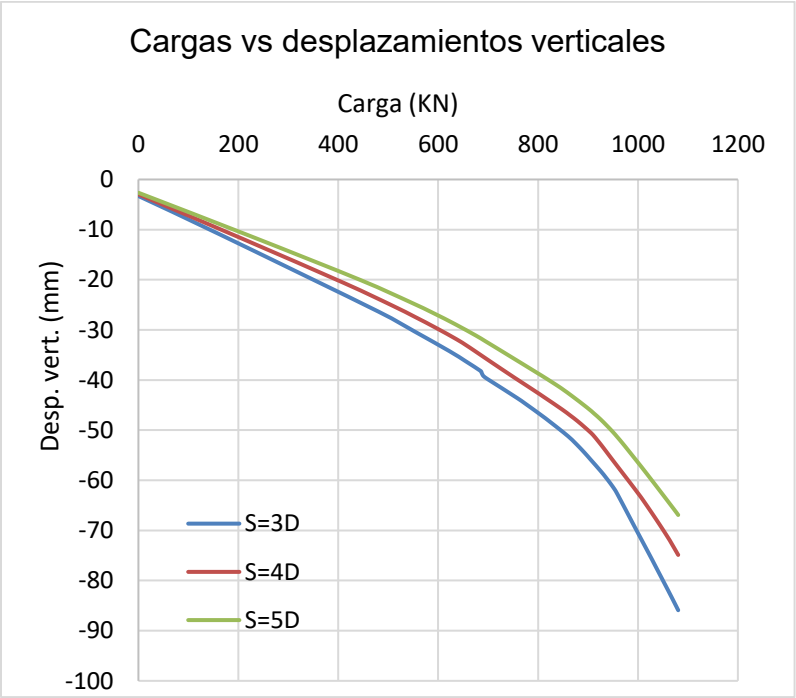
	S=3D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	642.92	721.50	729.44	6446.65
L30	848.76	935.92	928.88	8307.96
L35	1094.01	1163.86	1180.90	10473.06
L40	1410.66	1474.30	1493.95	13283.66
L45	1758.58	1814.05	1831.51	16340.82
L50	2043.43	2101.50	2122.95	18941.20
	S=4D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	744.70	801.73	816.28	7216.74
L30	938.92	1017.43	1016.78	9075.73
L35	1181.47	1255.58	1252.30	11213.02
L40	1516.20	1529.53	1527.70	13745.14
L45	1828.52	1892.72	1888.57	16953.71
L50	2156.21	2217.10	2208.01	19856.64
	S=5D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	802.02	853.22	864.74	7673.84
L30	1000.24	1072.97	1069.14	9568.71
L35	1248.53	1314.38	1308.55	11740.25
L40	1561.60	1623.33	1618.09	14527.30
L45	1890.06	1944.47	1941.98	17435.84
L50	2222.77	2276.44	2266.76	20395.55

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Eficiencia de grupos CIR_9P para D=0.40 m

Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.66	0.74	0.79
L30	0.71	0.78	0.82
L35	0.76	0.81	0.85
L40	0.81	0.84	0.89
L45	0.86	0.90	0.92
L50	0.88	0.92	0.95

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 16. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_9P_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes CIR_9P con diámetro D=0.60 m

En la Tabla 42, se presentan la carga última de los pilotes P-2, P-5 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 17 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-5 de longitud L=35 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 41 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 41. Eficiencia de grupos CIR_9P para D=0.60 m

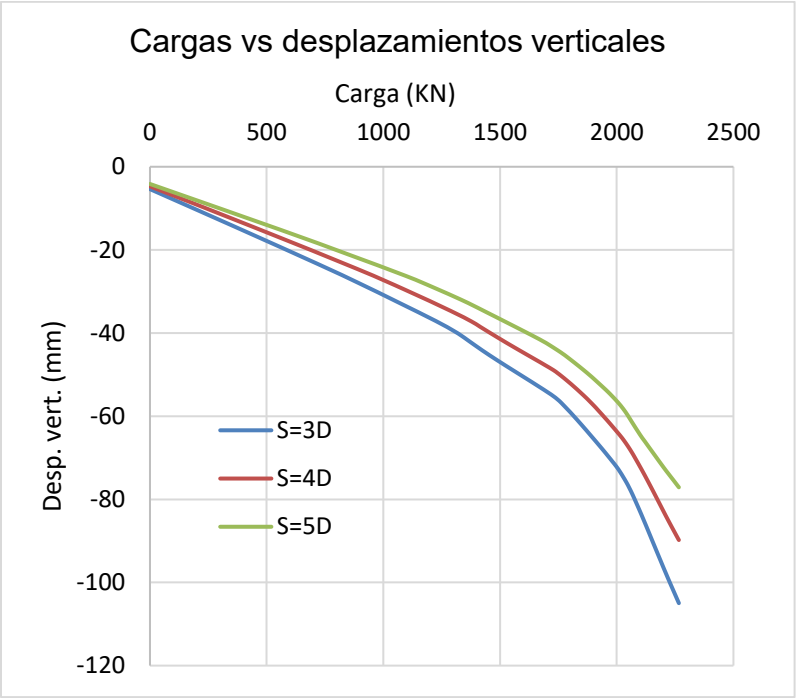
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.67	0.75	0.80
L30	0.71	0.77	0.82
L35	0.77	0.82	0.86
L40	0.81	0.85	0.88
L45	0.85	0.89	0.91
L50	0.88	0.91	0.93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Carga última (KN) de P-5, P-2, P-8 y de CIR_9P para D=0.60 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	955.24	1077.77	1088.17	9619.03
L30	1265.65	1367.19	1383.18	12267.13
L35	1646.20	1757.56	1762.23	15725.34
L40	2076.23	2184.54	2173.40	19508.01
L45	2553.11	2641.09	2637.87	23668.94
L50	3045.27	3128.34	3118.81	28033.90
	S=4D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	1111.53	1202.86	1197.57	10713.28
L30	1399.65	1481.41	1494.09	13301.66
L35	1782.97	1856.68	1870.09	16690.05
L40	2209.79	2292.24	2285.37	20520.25
L45	2692.13	2761.78	2755.04	24759.42
L50	3163.46	3226.96	3212.72	28922.16
	S=5D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	1201.34	1284.65	1280.76	11462.98
L30	1504.63	1579.05	1580.84	14144.22
L35	1888.03	1949.85	1962.19	17536.19
L40	2311.42	2371.07	2377.74	21306.63
L45	2767.73	2821.94	2812.82	25306.79
L50	3247.49	3291.46	3282.26	29542.39

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 17. Curvas de cargas Vs desp. Vert. de CIR_9P_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

Grupos de pilotes CIR_9P con diámetro D=0.80 m

En la Tabla 44, se presentan la carga última de los pilotes P-2, P-5 y P-8 y de los grupos para longitudes de 25, 30, 35, 40, 45 y 50 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Gráfica 18 muestra las curvas de carga vs deformación del pilote P-5 de longitud L=45 m y de separaciones 3D, 4D y 5D. La Tabla 43 presenta la eficiencia de los grupos de pilotes para las 3 separaciones y 6 longitudes consideradas.

Tabla 43. Eficiencia de grupos CIR_9P para D=0.80 m

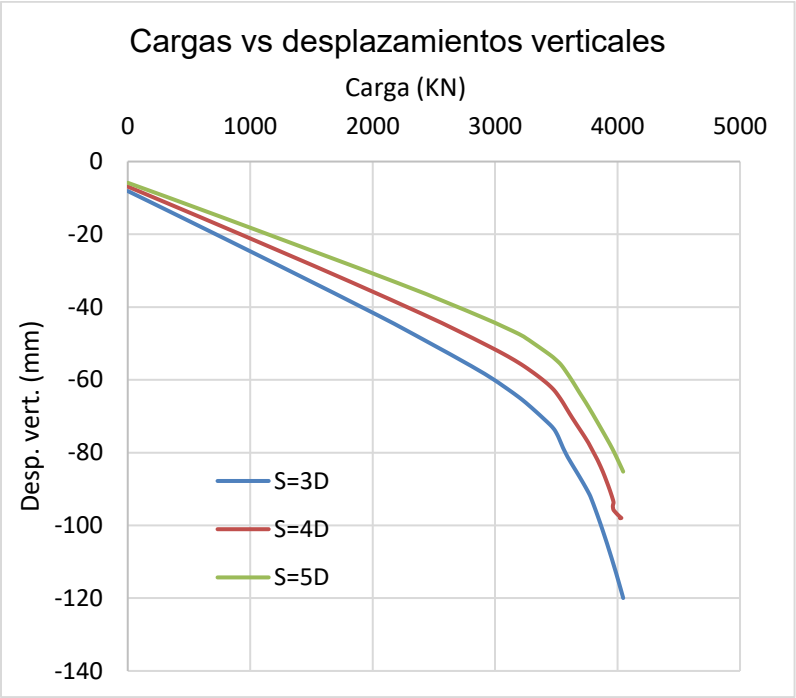
Pilote	S=3D	S=4D	S=5D
L25	0.69	0.77	0.82
L30	0.77	0.83	0.86
L35	0.80	0.84	0.88
L40	0.83	0.86	0.90
L45	0.85	0.89	0.91
L50	0.87	0.91	0.93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 44. Carga última (KN) de P-5, P-2, P-8 y de CIR_9P para D=0.80 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	1279.46	1479.03	1428.55	12909.80
L30	1679.87	1795.56	1841.98	16230.04
L35	2172.40	2269.60	2311.58	20497.10
L40	2732.16	2836.18	2890.50	25638.85
L45	3333.43	3432.53	3486.09	31007.93
L50	3946.95	4095.75	4038.61	36484.35
	S=4D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	1483.79	1619.54	1616.88	14429.47
L30	1839.55	1950.82	1953.06	17455.07
L35	2315.81	2395.61	2417.97	21570.13
L40	2892.29	2984.02	3005.61	26850.82
L45	3516.61	3618.77	3631.40	32517.25
L50	4140.92	4231.09	4211.35	37910.66
	S=5D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	1594.89	1738.92	1716.23	15415.50
L30	1925.37	2029.70	2047.36	18233.61
L35	2409.54	2506.35	2531.45	22560.75
L40	3017.10	3105.11	3134.39	27975.09
L45	3607.62	3699.15	3724.07	33300.51
L50	4223.96	4331.43	4303.84	38765.03

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 18. Curvas de cargas Vs desp. Vert. De CIR_9P_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.2 GRUPOS DE PILOTES ANTE CARGAS LATERALES

Los resultados presentados a continuación son los desplazamientos laterales en las cabezas de los pilotes individuales, de pilotes de los grupos en estudio y promedios de los grupos debido a las cargas laterales aplicadas. Por otra parte, se presentan curvas de desplazamiento lateral y de momento flector versus longitud de pilote.

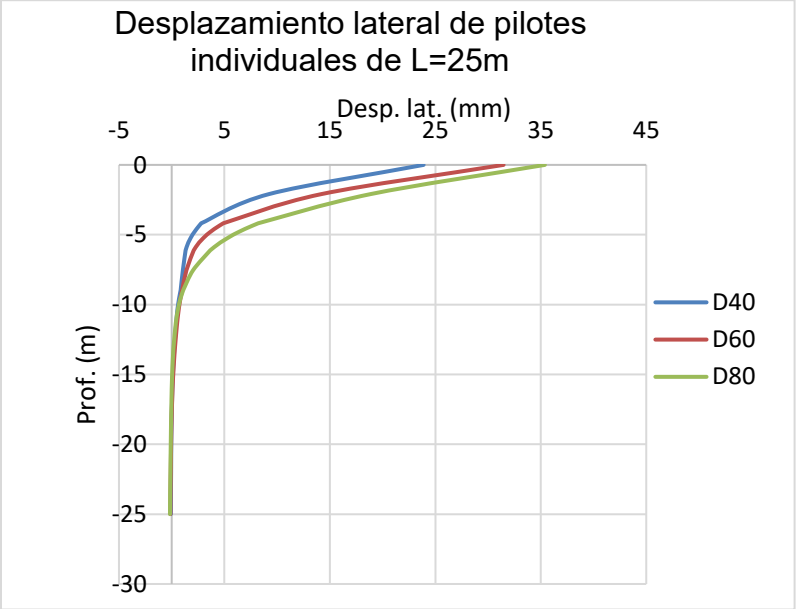
5.2.1 Pilotes individuales

En la Tabla 45, se presentan los desplazamientos laterales máximos producidos en la cabeza de los pilotes individuales debido a las cargas laterales aplicadas. Las Gráfica 19, Gráfica 20 y Gráfica 21 presentan las curvas de desplazamiento lateral vs profundidad para pilotes de longitudes 25, 35 y 45 m respectivamente. Las Gráfica 22, Gráfica 23 y Gráfica 24 presentan curvas de momentos flectores internos de los pilotes vs profundidad para longitudes de pilotes de 25, 35 y 45 m respectivamente.

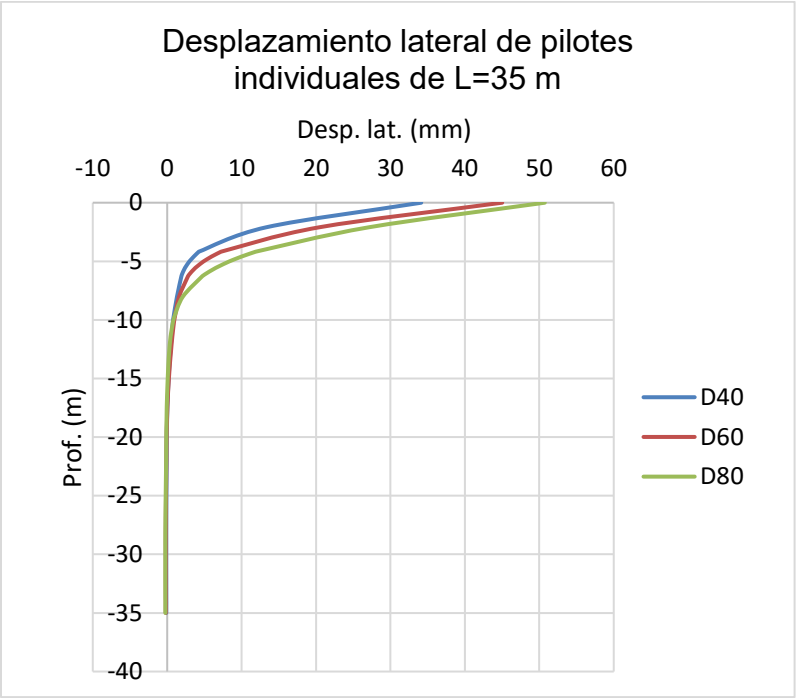
Tabla 45. Desplazamiento lateral (mm) de pilotes individuales

Pilote	D=0.40 m	D=0.60 m	D=0.80 m
L25	23.89	31.47	35.39
L35	34.14	45.01	50.74
L45	47.42	62.11	69.61

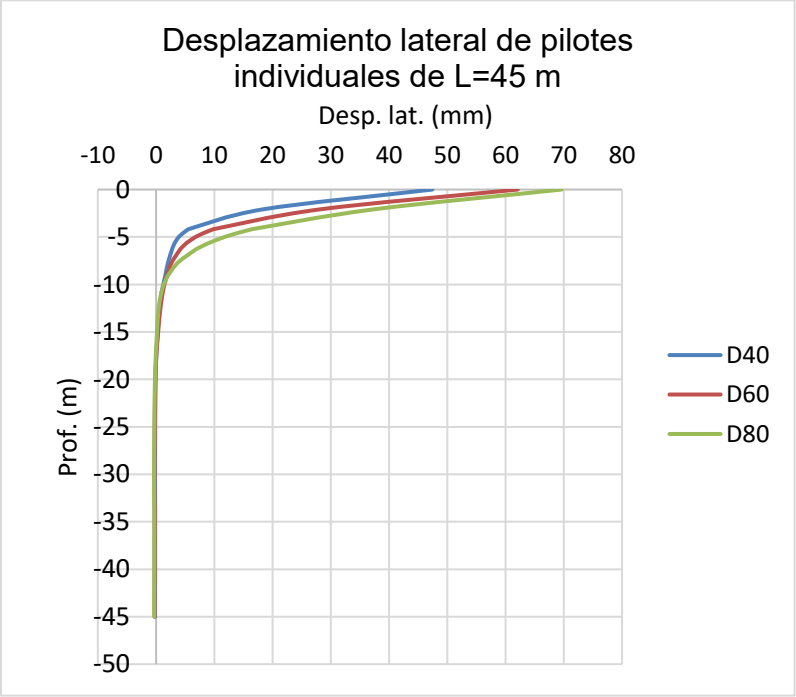
Fuente: Elaboración propia



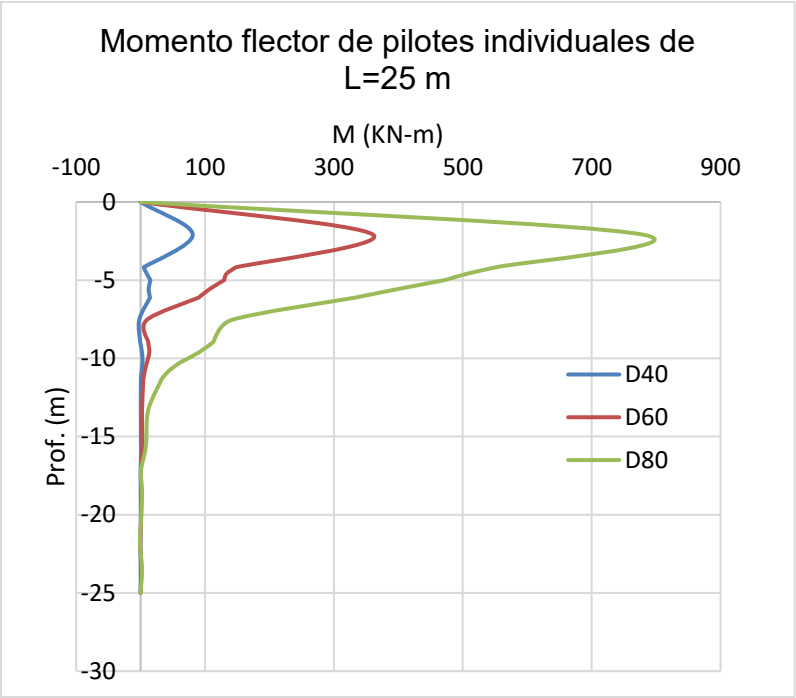
Gráfica 19. Curvas de desp. lat. Vs prof. de pilotes de L=25m
Fuente: Elaboración propia



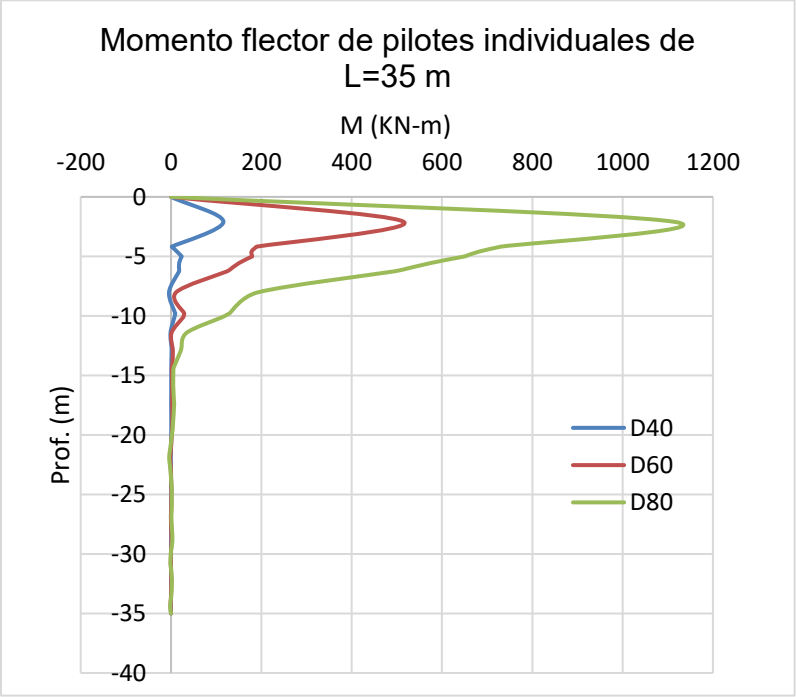
Gráfica 20. Curvas de desp. lat. Vs prof. de pilotes de L=35m
Fuente: Elaboración propia



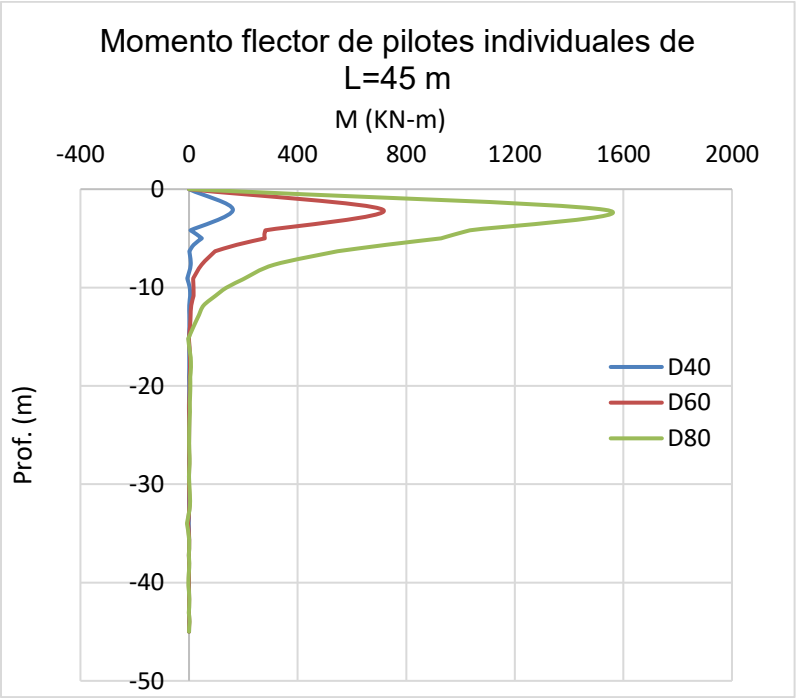
Gráfica 21. Curvas de desp. lat. Vs prof. de pilotes de L=45m
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 22. Curvas de momento flector. Vs prof. de pilotes de L=25m
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 23. Curvas de momento flector. Vs prof. de pilotes de L=25m
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 24. Curvas de momento flector. Vs prof. de pilotes de L=45m
Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2

De los resultados de grupos RE_2x2 ante las cargas laterales, se consideraron los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de pilotes P-1 y P-4 y a partir de ellos, se presentan el desplazamiento lateral promedio de los grupos. También, se presentan curvas de desplazamiento lateral de un pilote dentro del grupo para diferentes separaciones y se compararan con la curva de desplazamiento lateral del pilote trabajando individualmente.

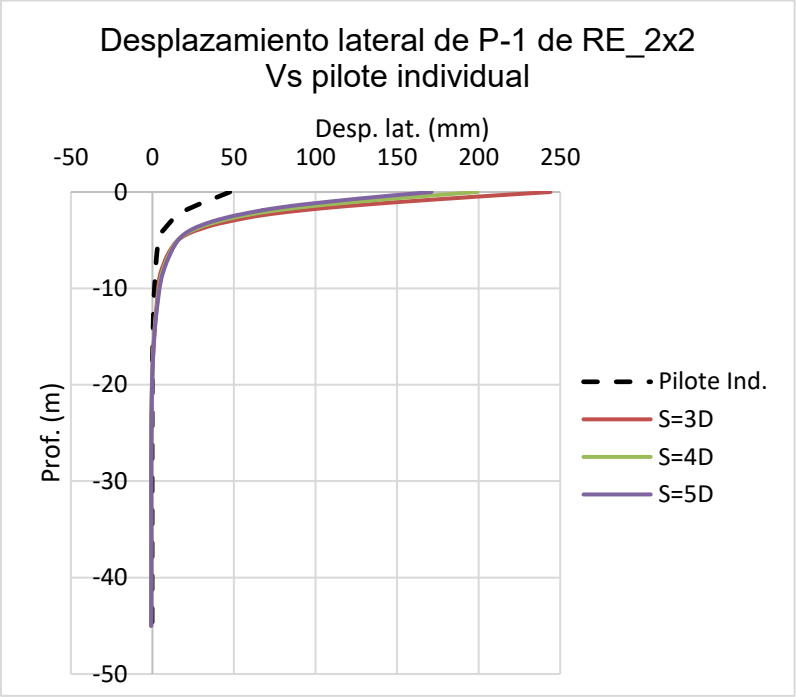
Grupos de pilotes RE_2x2 con diámetro D=0.40 m

La Tabla 46 muestra el desplazamiento lateral de P-1, P-4 y el promedio de RE_2x2 de diámetro de 0.40 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 25 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-1 del grupo RE_2x2 versus profundidad y la Gráfica 26 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-4 del grupo RE_2x2 versus profundidad para longitud de 45m y separaciones 3D, 4D y 5D.

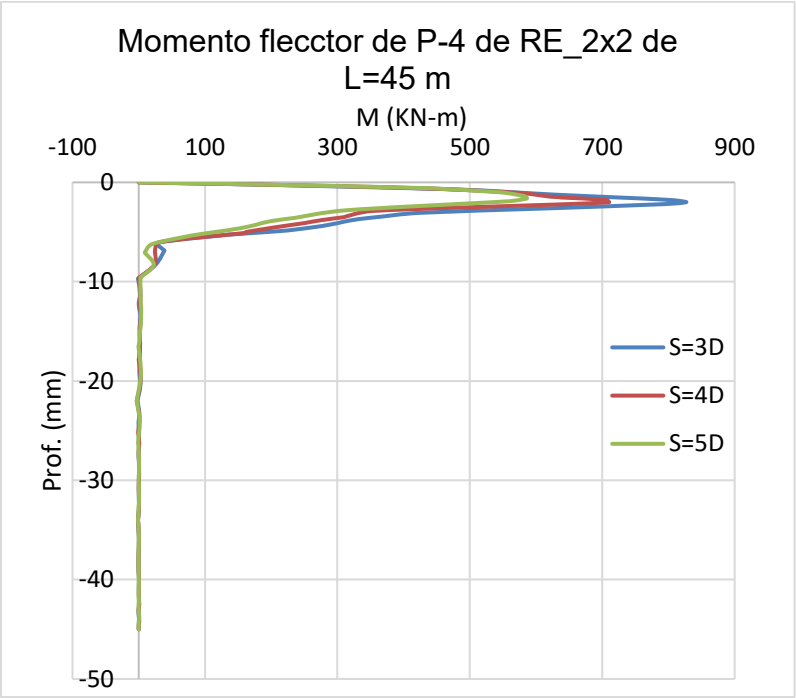
Tabla 46. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	98.39	86.96	92.68	81.33	81.36	81.34	73.06	73.33	73.19
L35	146.39	143.39	144.89	122.73	121.64	122.19	108.66	108.40	108.53
L45	243.97	231.32	237.65	199.19	191.45	195.32	171.16	162.52	166.84

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 25. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-1 de RE_2x2_D40_L45
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 26. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L45
Fuente: Elaboración propia

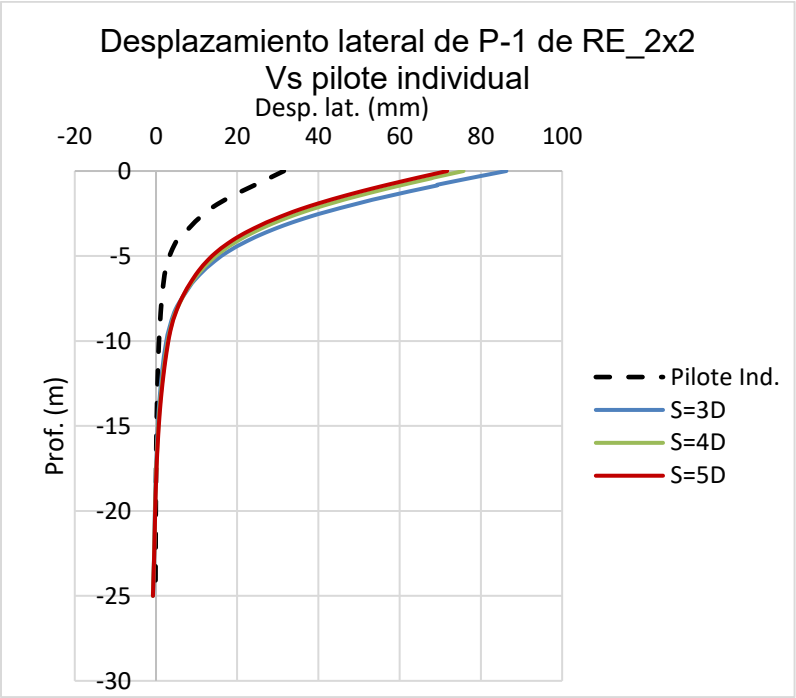
Grupos de pilotes RE_2x2 con diámetro D=0.60 m

La Tabla 47 muestra el desplazamiento lateral de P-1, P-4 y el promedio de RE_2x2 de diámetro de 0.60 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45m. La Gráfica 27 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-1 del grupo RE_2x2 versus profundidad y la Gráfica 28 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-4 del grupo RE_2x2 versus profundidad para longitud de 25 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

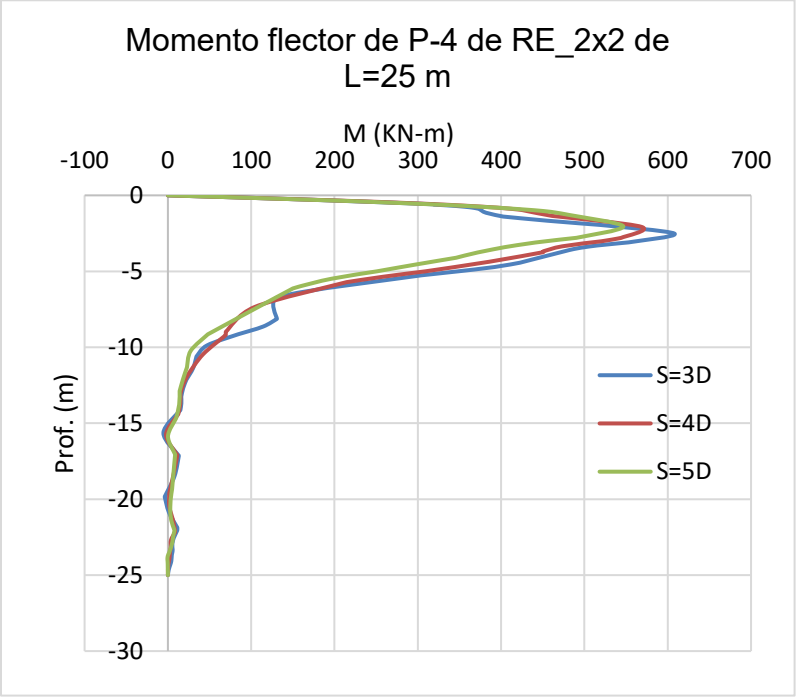
Tabla 47. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	86.26	83.48	84.87	75.72	76.70	76.21	71.70	69.67	70.68
L35	129.20	123.16	126.18	112.02	114.11	113.07	105.28	102.46	103.87
L45	195.38	183.59	189.48	166.31	163.46	164.88	152.35	146.45	149.40

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 27. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-1 de RE_2x2_D60_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 28. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L25
Fuente: Elaboración propia

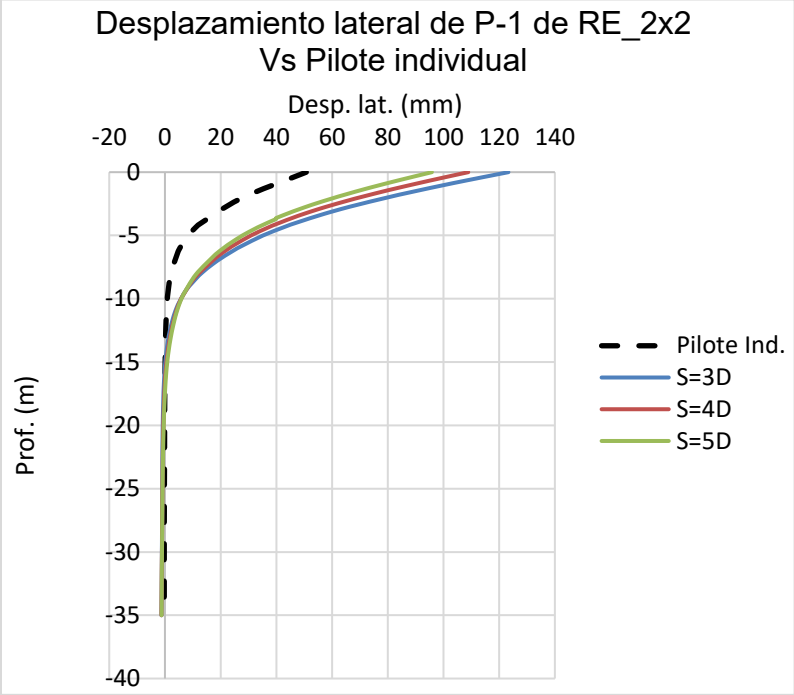
Grupos de pilotes RE_2x2 con diámetro D=0.80 m

La Tabla 48 muestra el desplazamiento lateral de P-1, P-4 y el promedio de RE_2x2 de diámetro de 0.80 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45m. La Gráfica 29 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-1 del grupo RE_2x2 versus profundidad y la Gráfica 30 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-4 del grupo RE_2x2 versus profundidad para longitud de 35 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

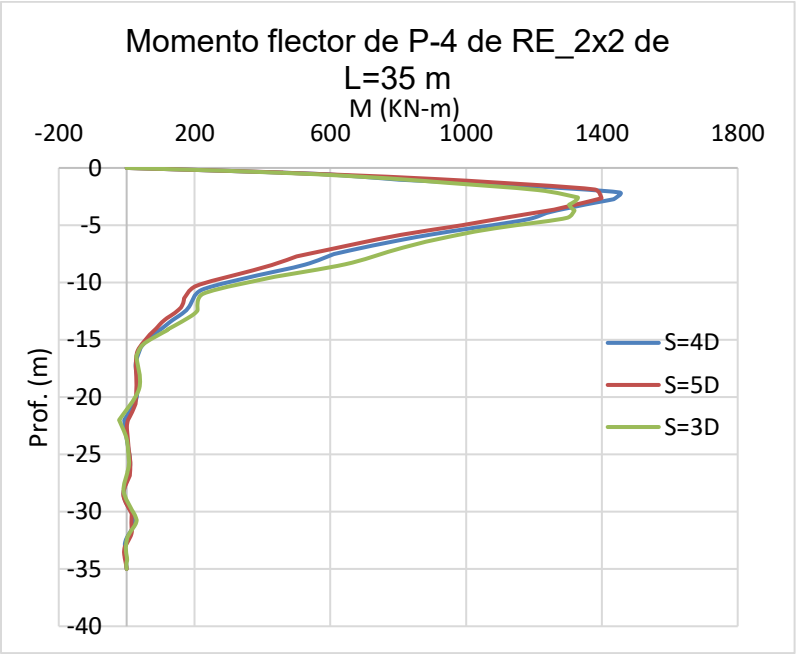
Tabla 48. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	85.17	80.99	83.08	74.59	74.40	74.50	66.33	67.62	66.98
L35	123.31	117.86	120.59	108.90	108.75	108.82	95.85	98.75	97.30
L45	171.43	165.39	168.41	149.79	151.43	150.61	133.13	137.22	135.18

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 29. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-1 de RE_2x2_D80_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 30. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L35
Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Grupos de pilotes rectangular RE_3x3

De los resultados de grupos RE_3x3 ante las cargas laterales, se consideraron los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de pilotes P-4 y P-8 (ver Figura 40b) y a partir de ellos, se presentan el desplazamiento lateral promedio de los grupos. También, se presentan curvas de desplazamiento lateral de un pilote dentro del grupo para diferentes separaciones y se compararan con la curva de desplazamiento lateral del pilote trabajando individualmente.

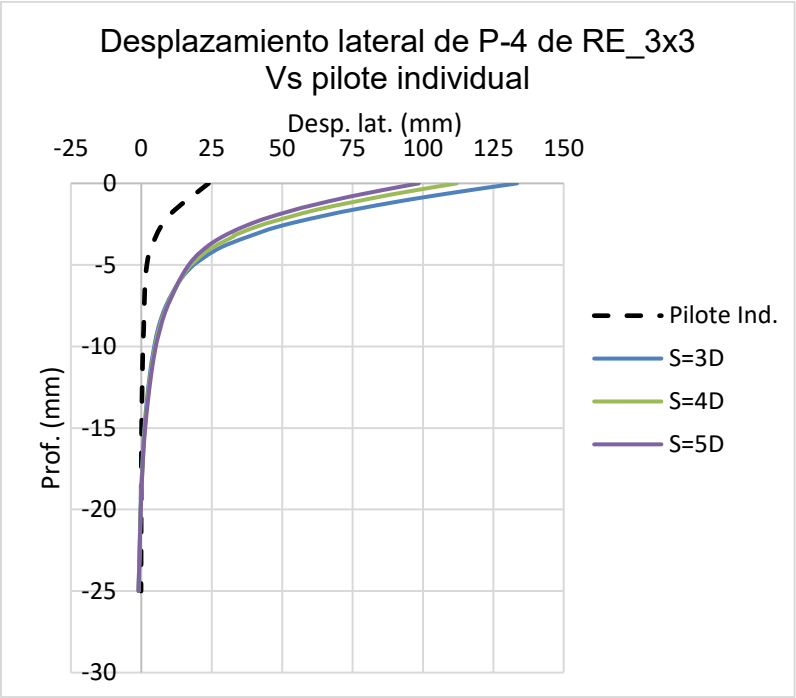
Grupos de pilotes RE_3x3 con diámetro D=0.40 m

La Tabla 49 muestra el desplazamiento lateral de P-4, P-8 y el promedio de RE_3x3 de diámetro de 0.40 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 31 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-4 del grupo RE_3x3 versus profundidad y la Gráfica 32 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-8 del grupo RE_3x3 versus profundidad para longitud de 25 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

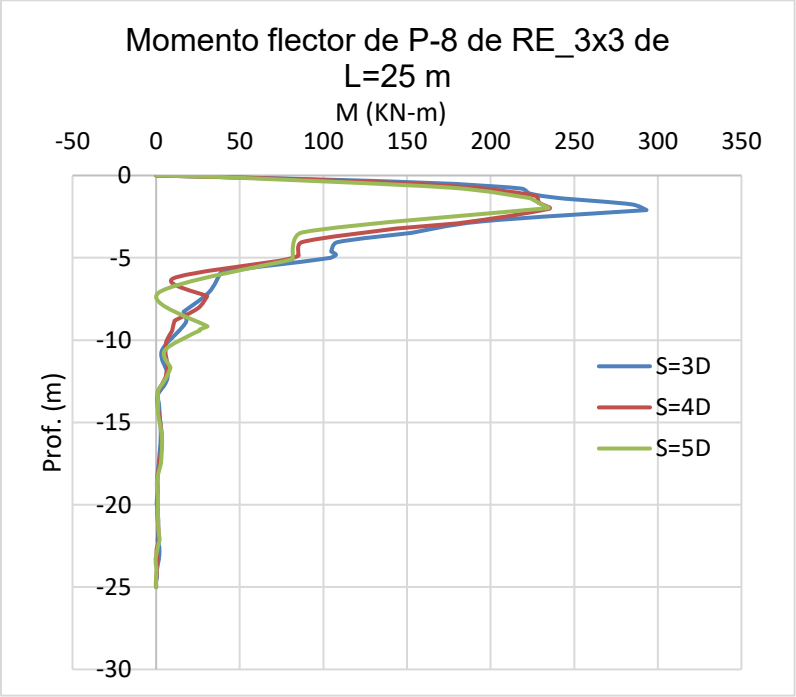
Tabla 49. Desplazamiento lateral (mm) De P-4, P-8 y RE_3x3 para D=0.40 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3	P-4	P-8	RE_3x3	P-4	P-8	RE_3x3
L25	133.43	120.40	126.91	112.05	100.57	106.31	98.55	86.46	92.51
L35	214.73	188.46	201.59	170.12	156.27	163.19	145.74	130.30	138.02
L45	367.84	312.39	340.11	278.73	254.48	266.61	225.82	198.66	212.24

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 31. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_3x3_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 32. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 de RE_3x3_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

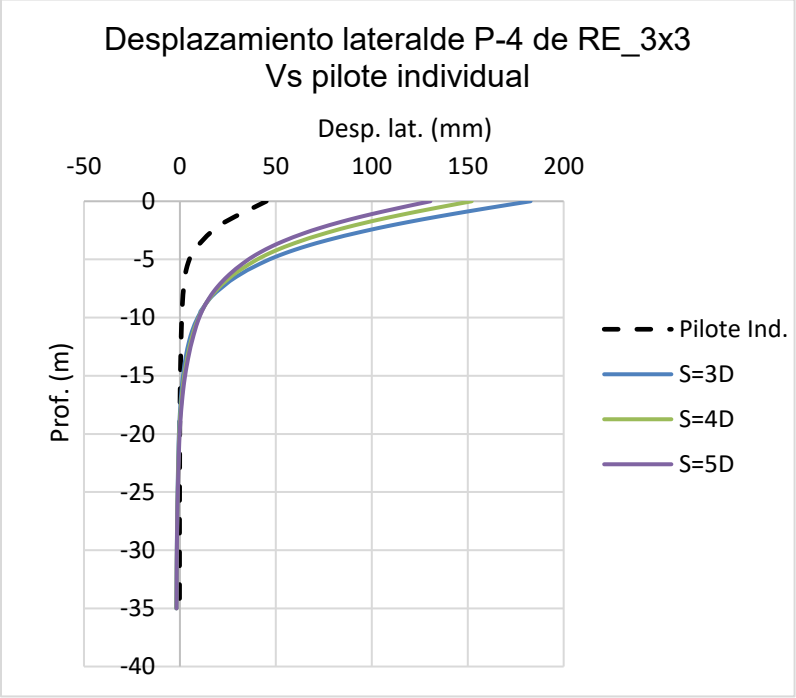
Grupos de pilotes RE_3x3 con diámetro D=0.60 m

La Tabla 50 muestra el desplazamiento lateral de P-4, P-8 y el promedio de RE_3x3 de diámetro de 0.60 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 33 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-4 del grupo RE_3x3 versus profundidad y la Gráfica 34 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-8 del grupo RE_3x3 versus profundidad para longitud de 35 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

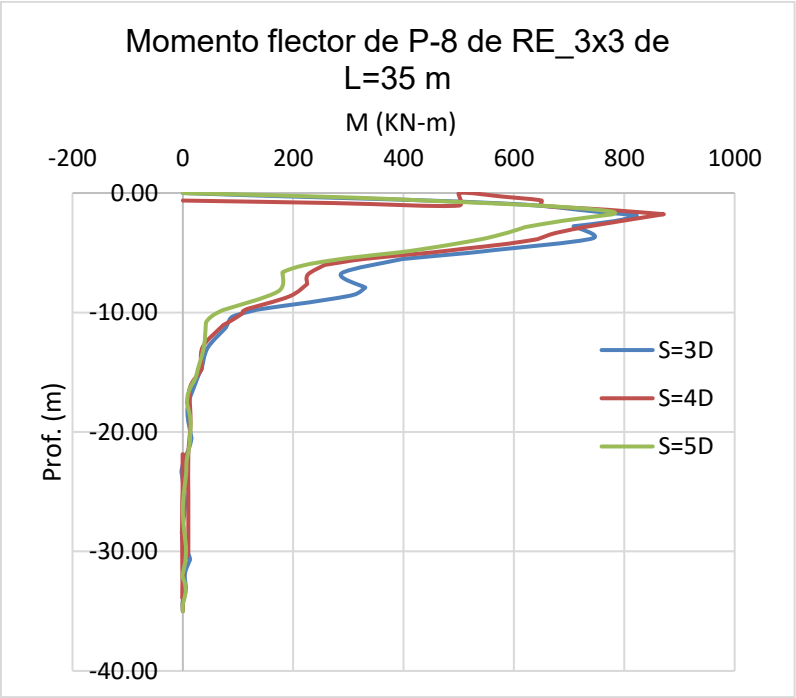
Tabla 50. Desplazamiento lateral (mm) De P-4, P-8 y RE_3x3 para D=0.60 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3	P-4	P-8	RE_3x3	P-4	P-8	RE_3x3
L25	124.69	110.16	117.43	104.32	96.51	100.41	90.02	83.07	86.55
L35	182.74	163.19	172.97	152.07	122.08	137.07	130.55	121.12	125.84
L45	283.83	245.94	264.88	220.60	204.99	212.80	185.24	173.17	179.20

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 33. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_3x3_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 34. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 de RE_3x3_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

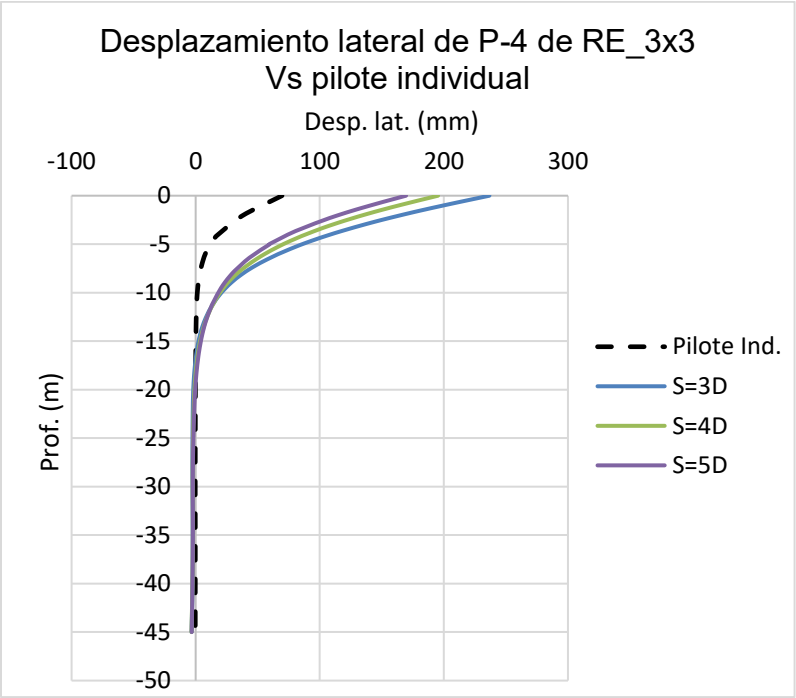
Grupos de pilotes RE_3x3 con diámetro D=0.80 m

La Tabla 51 muestra el desplazamiento lateral de P-4, P-8 y el promedio de RE_3x3 de diámetro de 0.80 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 35 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-4 del grupo RE_3x3 versus profundidad y la Gráfica 36 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-8 del grupo RE_3x3 versus profundidad para longitud de 45 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

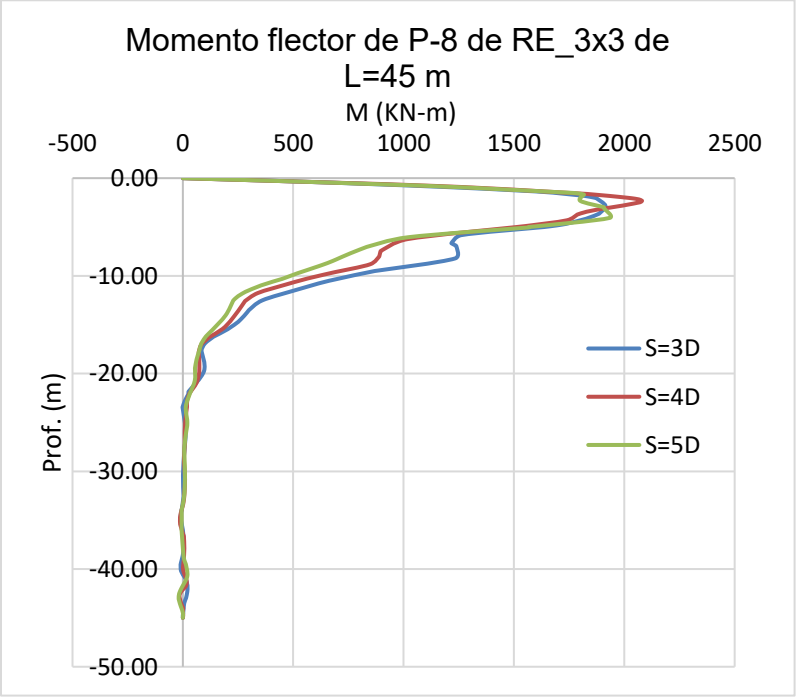
Tabla 51. Desplazamiento lateral (mm) De P-4, P-8 y RE_3x3 para D=0.80 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-4	P-8	RE_3x3	P-4	P-8	RE_3x3	P-4	P-8	RE_3x3
L25	115.24	105.82	110.53	96.74	91.67	94.20	85.38	82.11	83.74
L35	167.29	153.90	160.59	140.23	133.36	136.79	123.33	118.73	121.03
L45	236.73	219.49	228.11	195.34	187.99	191.67	169.53	167.03	168.28

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 35. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_3x3_D80_L45
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 36. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 de RE_3x3_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Grupos de pilotes cuadricular CU_3x3

De los resultados de grupos CU_2x2 ante las cargas laterales, se consideraron los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de pilotes P-4, P-5 y P-9 (ver Figura 40c) y a partir de ellos, se presentan el desplazamiento lateral promedio de los grupos. También, se presentan curvas de desplazamiento lateral de un pilote dentro del grupo para diferentes separaciones y se compararan con la curva de desplazamiento lateral del pilote trabajando individualmente.

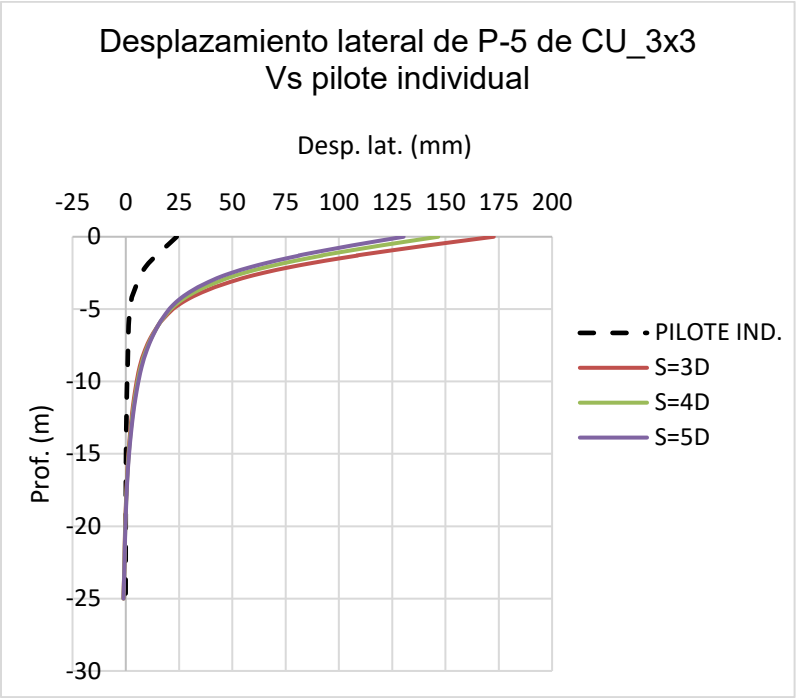
Grupos de pilotes CU_3x3 con diámetro D=0.40 m

La Tabla 52 muestra el desplazamiento lateral de P-4, P-5, P-9 y el promedio de CU_3x3 de diámetro de 0.40 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 37 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-5 del grupo CU_3x3 versus profundidad y la Gráfica 38 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-9 del grupo CU_3x3 versus profundidad para longitud de 25 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

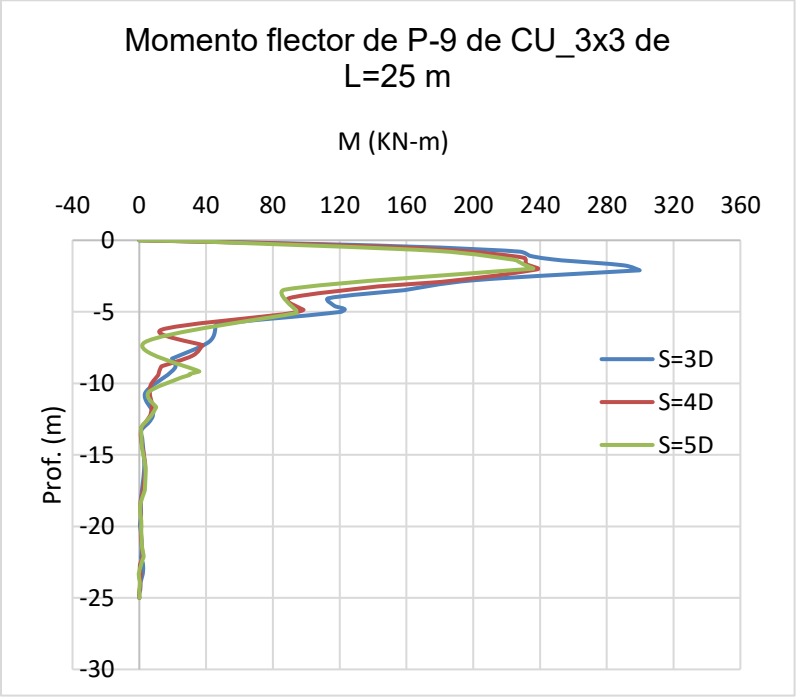
Tabla 52. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-4, P-9 y CU_3x3 para D=0.40 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	172.62	155.32	133.77	147.67
L35	294.70	262.30	214.01	244.44
L45	517.18	468.87	368.26	429.52
	S=4D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	146.57	129.47	110.01	122.72
L35	235.43	205.26	173.93	194.69
L45	407.85	356.45	294.87	334.79
	S=5D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	130.34	113.30	94.03	106.63
L35	200.47	170.76	142.01	161.29
L45	325.61	280.54	220.95	259.06

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 37. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CU_3x3_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 38. Curvas de momento flector Vs prof. de P-9 de CU_3x3_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

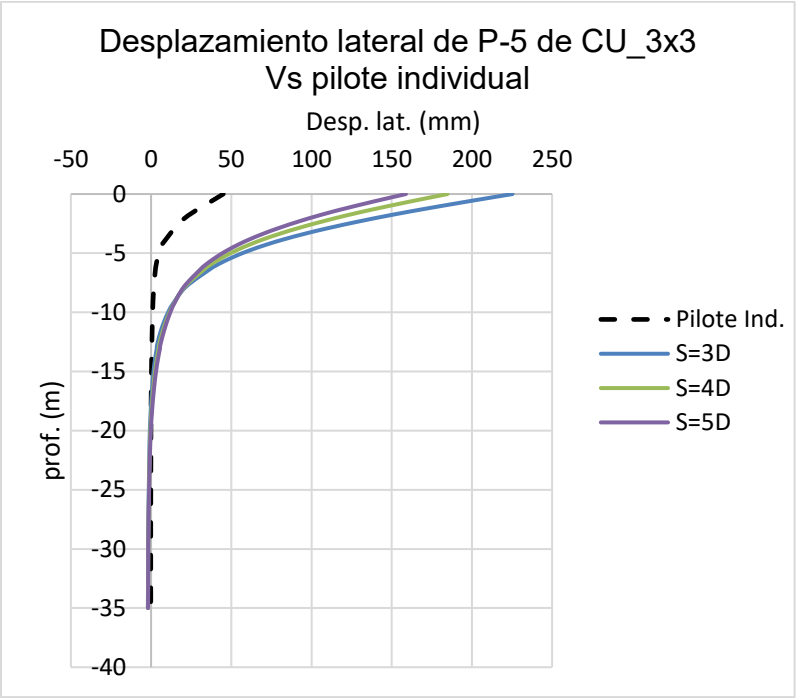
Grupos de pilotes CU_3x3 con diámetro D=0.60 m

La Tabla 53 muestra el desplazamiento lateral de P-4, P-5, P-9 y el promedio de CU_3x3 de diámetro de 0.60 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 39 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-5 del grupo CU_3x3 versus profundidad y la Gráfica 40 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-9 del grupo CU_3x3 versus profundidad para longitud de 35 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

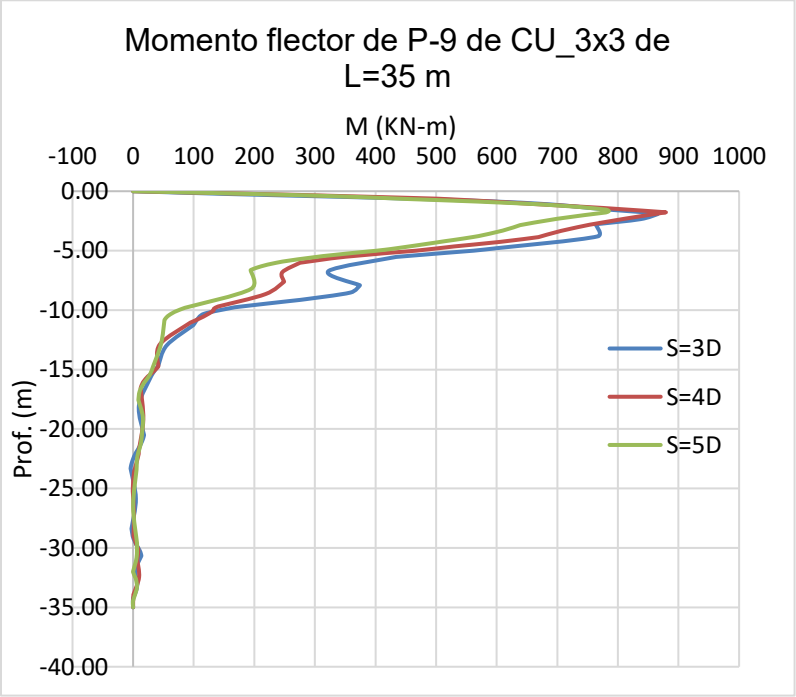
Tabla 53. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-4, P-9 y CU_3x3 para D=0.60 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	149.95	142.93	122.14	134.47
L35	225.34	214.14	183.09	201.59
L45	359.35	345.40	284.78	320.01
	S=4D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	126.03	120.26	105.72	114.44
L35	184.80	176.72	155.47	168.17
L45	275.14	263.32	228.89	249.33
	S=5D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	109.40	103.64	90.35	98.37
L35	158.90	151.09	132.04	143.49
L45	227.31	216.02	189.77	205.61

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 39. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CU_3x3_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 40. Curvas de momento flector Vs prof. de P-9 de CU_3x3_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

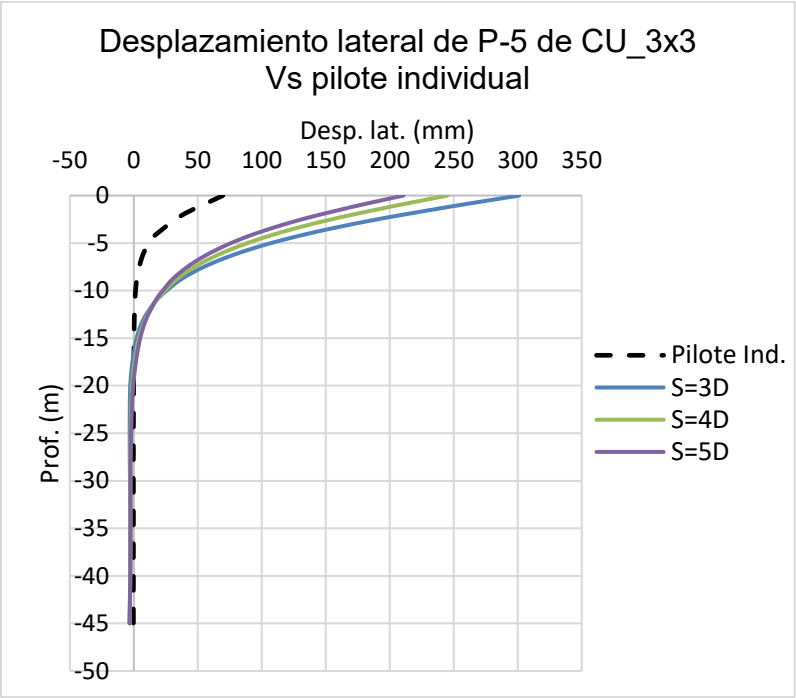
Grupos de pilotes CU_3x3 con diámetro D=0.80 m

La Tabla 54 muestra el desplazamiento lateral de P-4, P-5, P-9 y el promedio de CU_3x3 de diámetro de 0.80 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 41 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-5 del grupo CU_3x3 versus profundidad y la Gráfica 42 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-4 del grupo CU_3x3 versus profundidad para longitud de 45 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

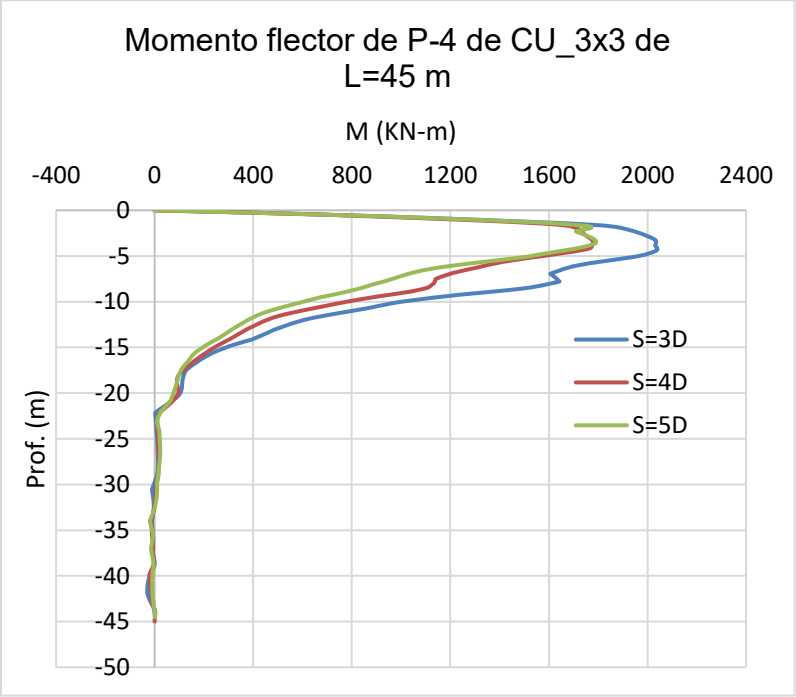
Tabla 54. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-4, P-9 y CU_3x3 para D=0.80 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	142.97	132.63	116.20	126.48
L35	207.00	192.83	169.81	184.17
L45	301.18	277.76	246.77	266.59
	S=4D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	121.44	111.53	99.96	107.49
L35	175.05	162.13	145.76	156.29
L45	245.28	223.90	206.06	218.34
	S=5D			
Pilote	P-5	P-4	P-9	CU_3x3
L25	105.65	98.04	88.52	94.65
L35	151.54	141.71	128.23	136.81
L45	210.69	195.30	181.00	190.66

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 41. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CU_3x3_D80_L45
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 42. Curvas de momento flector Vs prof. de P-4 de CU_3x3_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.2.5 Grupos de pilotes circular CIR_8P

De los resultados de grupos CIR_8P ante las cargas laterales, se consideraron los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de pilotes P-2 y P-7 (ver Figura 40d) y a partir de ellos, se presentan el desplazamiento lateral promedio de los grupos. También, se presentan curvas de desplazamiento lateral de un pilote dentro del grupo para diferentes separaciones y se compararan con la curva de desplazamiento lateral del pilote trabajando individualmente.

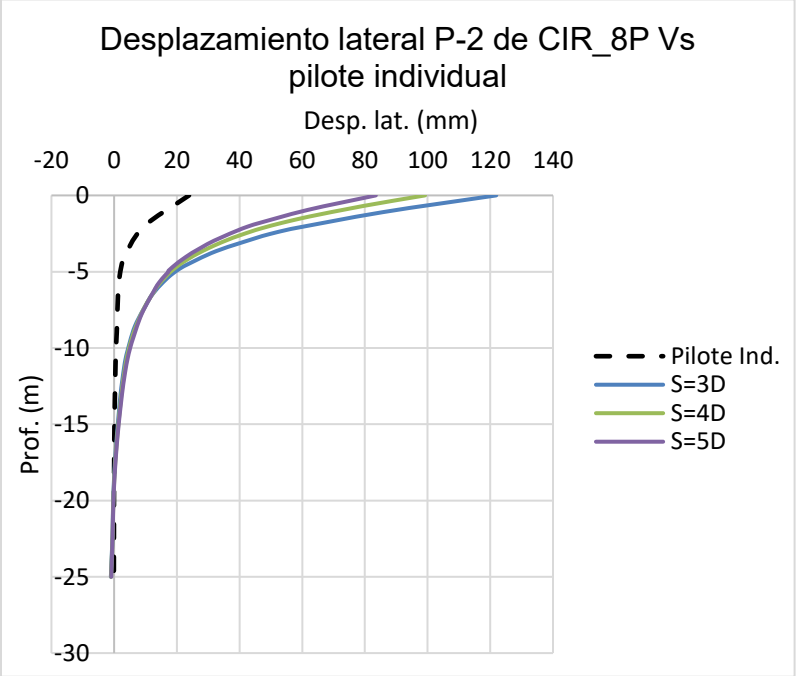
Grupos de pilotes CIR_8P con diámetro D=0.40 m

La Tabla 55 muestra el desplazamiento lateral de P-2, P-7 y el promedio de CIR_8P de diámetro de 0.40 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 43 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-2 del grupo CIR_8P versus profundidad y la Gráfica 44 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-7 del grupo CIR_8P versus profundidad para longitud de 25 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

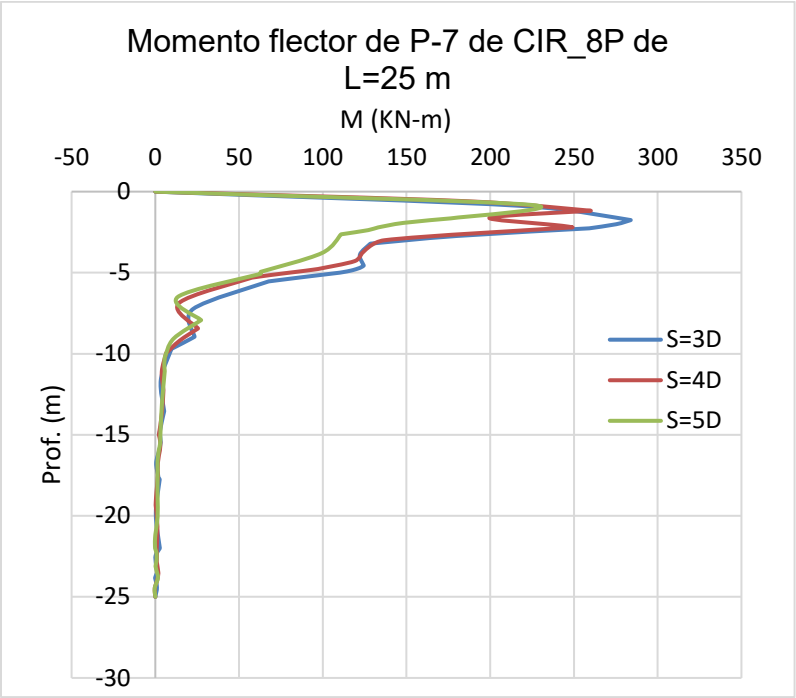
Tabla 55. Desplazamiento lateral (mm) De P-2, P-7 y CIR_8P para D=0.40 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P	P-2	P-7	CIR_8P	P-2	P-7	CIR_8P
L25	121.90	121.19	121.54	99.18	104.55	101.86	83.49	85.77	84.63
L35	187.68	190.73	189.21	146.98	158.26	152.62	121.59	126.75	124.17
L45	333.23	323.34	328.28	230.20	253.08	241.64	179.98	197.66	188.82

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 43. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-2 de CIR_8P_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 44. Curvas de momento flector Vs prof. de P-7 CIR_8P_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

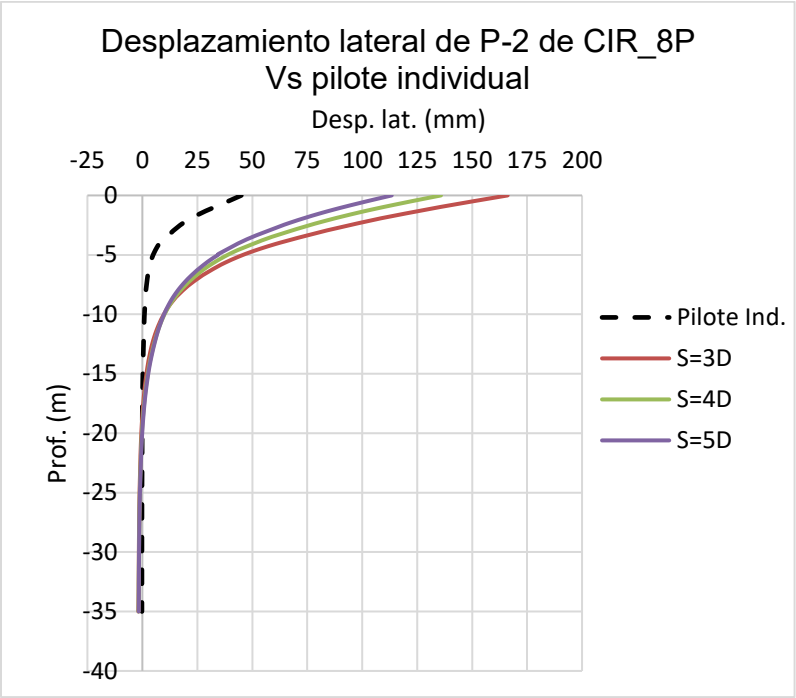
Grupos de pilotes CIR_8P con diámetro D=0.60 m

La Tabla 56 muestra el desplazamiento lateral de P-2, P-7 y el promedio de CIR_8P de diámetro de 0.60 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 45 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-2 del grupo CIR_8P versus profundidad y la Gráfica 46 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-7 del grupo CIR_8P versus profundidad para longitud de 35 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

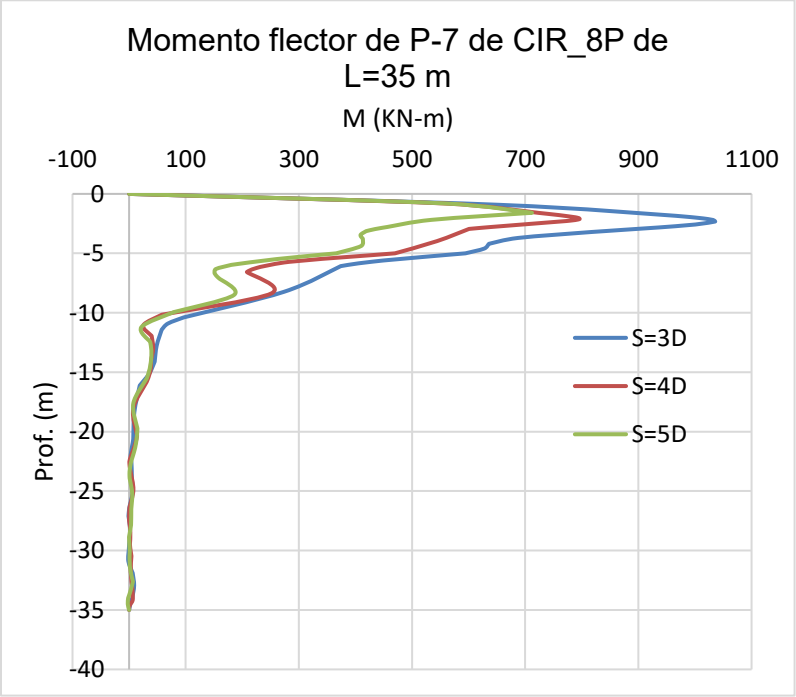
Tabla 56. Desplazamiento lateral (mm) De P-2, P-7 y CIR_8P para D=0.60 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P	P-2	P-7	CIR_8P	P-2	P-7	CIR_8P
L25	114.06	117.31	115.69	94.67	94.49	94.58	79.13	77.20	78.17
L35	166.16	174.32	170.24	135.82	139.09	137.45	113.43	111.33	112.38
L45	242.20	252.74	247.47	191.70	196.72	194.21	158.11	157.96	158.03

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 45. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-2 de CIR_8P_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 46. Curvas de momento flector Vs prof. de P-7 CIR_8P_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

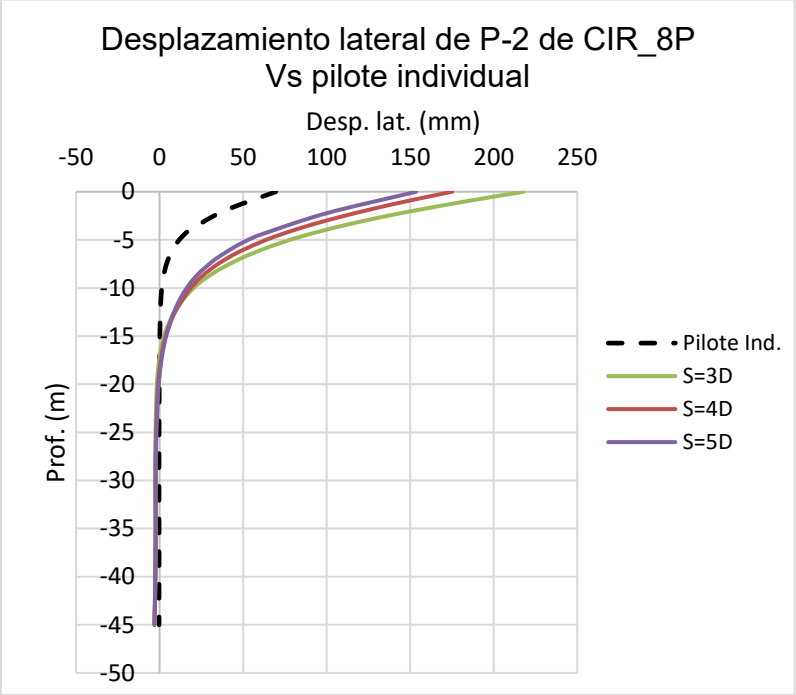
Grupos de pilotes CIR_8P con diámetro D=0.80 m

La Tabla 57 muestra el desplazamiento lateral de P-2, P-7 y el promedio de CIR_8P de diámetro de 0.80 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 47 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-2 del grupo CIR_8P versus profundidad y la Gráfica 48 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-7 del grupo CIR_8P versus profundidad para longitud de 45 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

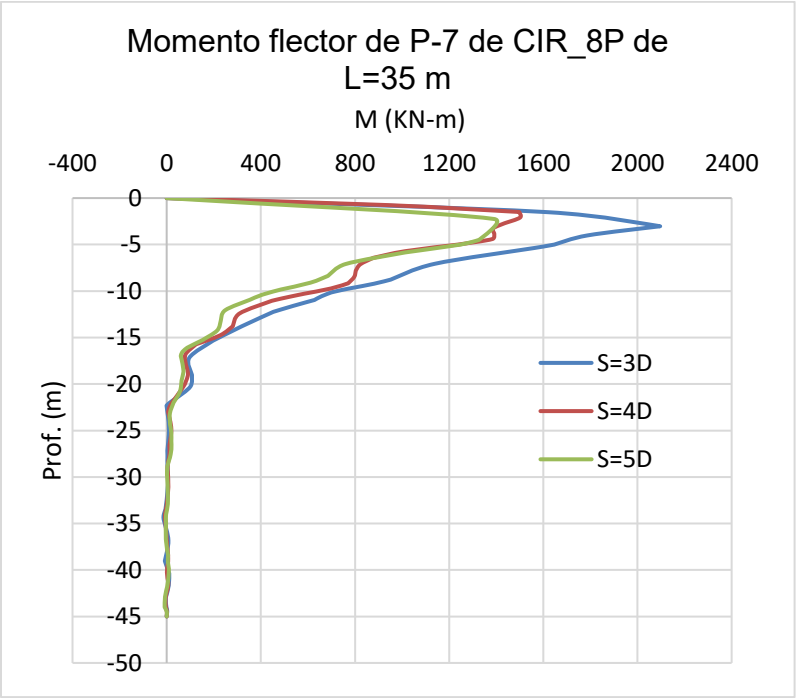
Tabla 57. Desplazamiento lateral (mm) De P-2, P-7 y CIR_8P para D=0.80 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-2	P-7	CIR_8P	P-2	P-7	CIR_8P	P-2	P-7	CIR_8P
L25	105.31	106.45	105.88	86.18	86.57	86.38	73.29	77.59	75.44
L35	151.57	154.47	153.02	123.39	124.58	123.99	104.47	111.11	107.79
L45	218.00	218.15	218.07	175.20	173.58	174.39	153.64	153.52	153.58

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 47. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-2 de CIR_8P_D80_L45
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 48. Curvas de momento flector Vs prof. de P-7 CIR_8P_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.2.6 Grupos de pilotes circular CIR_9P

De los resultados de grupos CIR_9P ante las cargas laterales, se consideraron los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de pilotes P-2, P-5 y P-8 (ver Figura 40e) y a partir de ellos, se presentan el desplazamiento lateral promedio de los grupos. También, se presentan curvas de desplazamiento lateral de un pilote dentro del grupo para diferentes separaciones y se compararan con la curva de desplazamiento lateral del pilote trabajando individualmente.

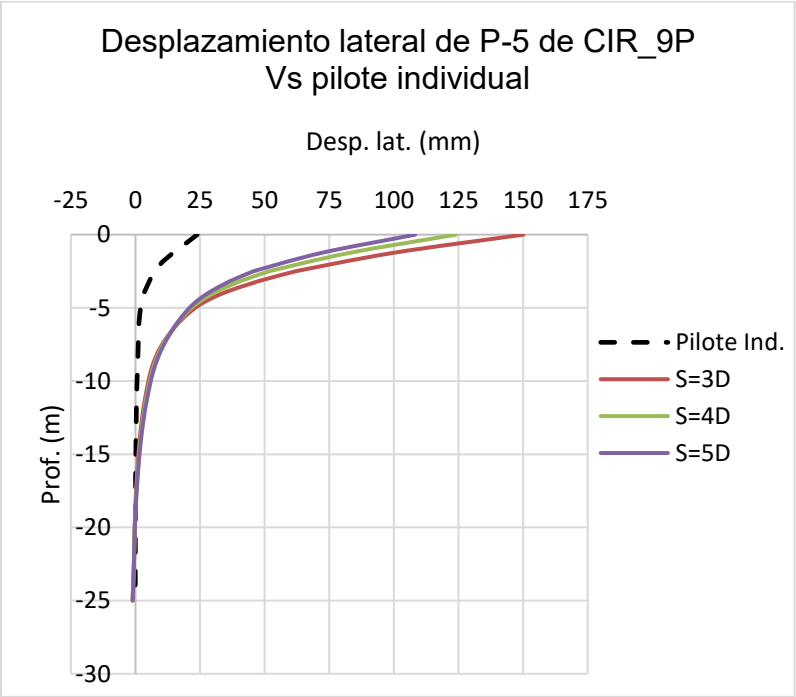
Grupos de pilotes CIR_9P con diámetro D=0.40 m

La Tabla 58 muestra el desplazamiento lateral de P-2, P-5, P-8 y el promedio de CIR_9P de diámetro de 0.40 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 49 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-5 del grupo CIR_9P versus profundidad y la Gráfica 50 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-8 del grupo CIR_9P versus profundidad para longitud de 25 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

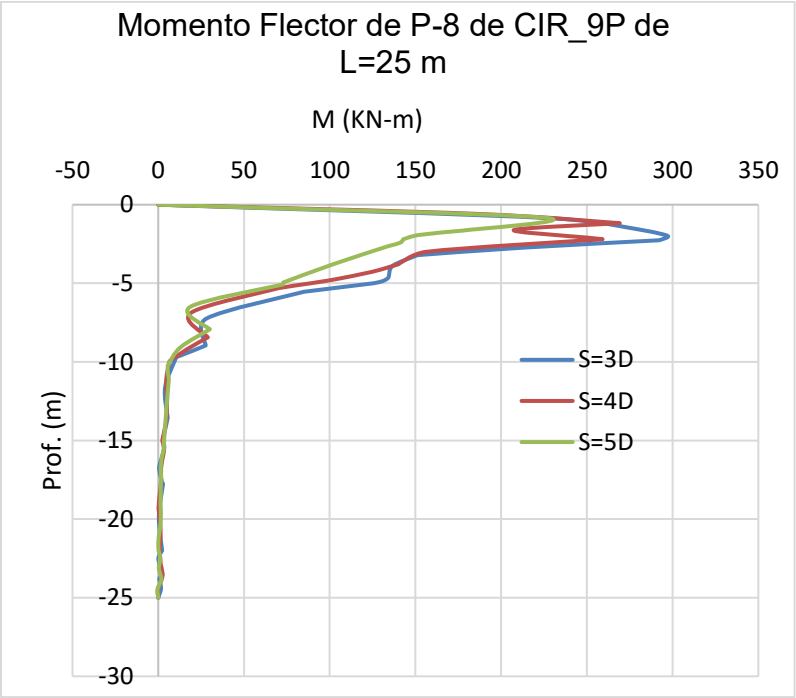
Tabla 58. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-2, P-8 y CU_9P para D=0.40 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	150.11	137.83	138.54	139.51
L35	245.31	223.06	224.63	226.23
L45	420.69	380.24	381.40	385.25
	S=4D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	124.01	112.35	116.96	115.70
L35	188.11	170.14	181.71	177.28
L45	311.85	274.55	298.55	289.36
	S=5D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	108.27	94.39	95.16	96.28
L35	160.02	138.37	141.21	142.04
L45	246.33	210.04	226.76	221.50

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 49. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CIR_9P_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 50. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 CIR_9P_D40_L25
Fuente: Elaboración propia

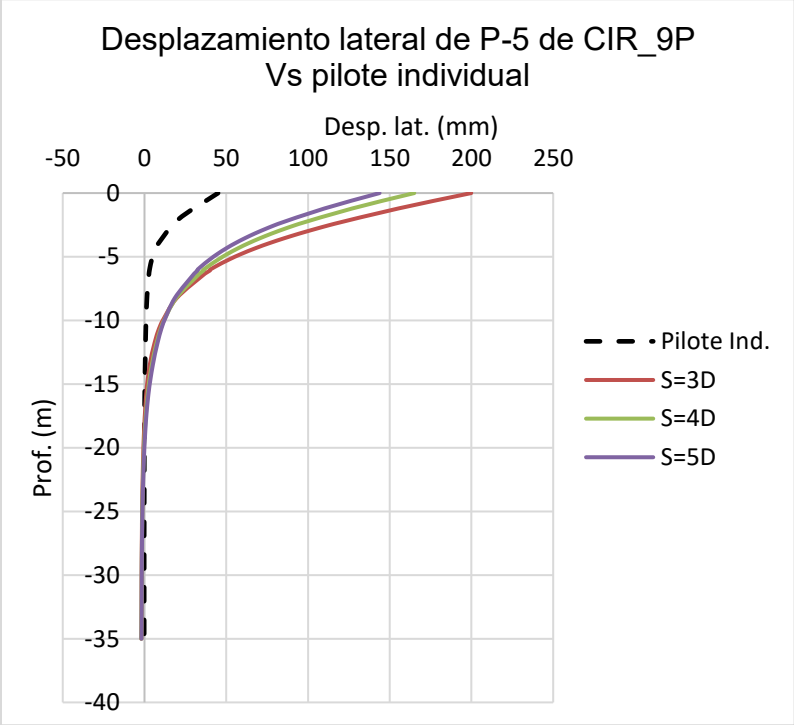
Grupos de pilotes CIR_9P con diámetro D=0.60 m

La Tabla 59 muestra el desplazamiento lateral de P-2, P-5, P-8 y el promedio de CIR_9P de diámetro de 0.60 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 51 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-5 del grupo CIR_9P versus profundidad y la Gráfica 52 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-8 del grupo CIR_9P versus profundidad para longitud de 35 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

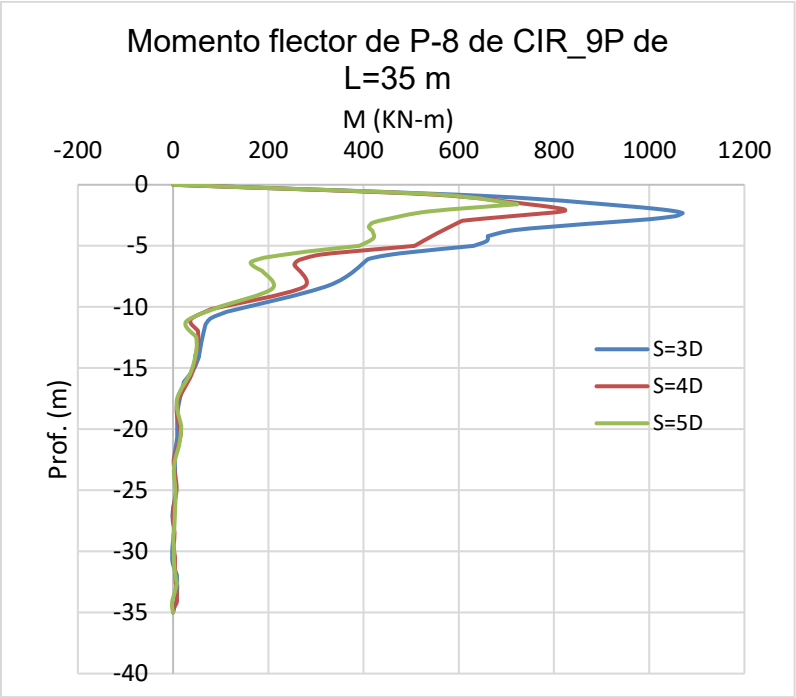
Tabla 59. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-2, P-8 y CU_9P para D=0.60 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	136.01	128.99	130.45	130.42
L35	199.88	188.96	194.33	192.56
L45	299.17	284.75	287.70	287.66
	S=4D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	113.84	107.63	104.05	106.73
L35	165.04	154.84	153.73	155.48
L45	234.35	221.47	218.10	221.41
	S=5D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	99.67	89.74	84.95	88.71
L35	143.80	128.81	122.79	127.80
L45	200.96	180.55	174.17	179.99

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 51. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CIR_9P_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 52. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 CIR_9P_D60_L35
Fuente: Elaboración propia

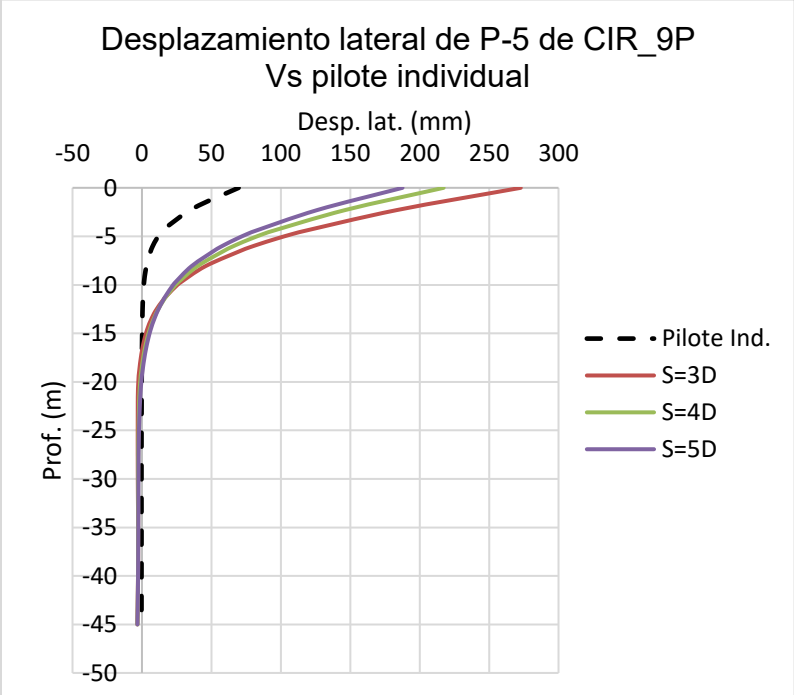
Grupos de pilotes CIR_9P con diámetro D=0.80 m

La Tabla 60 muestra el desplazamiento lateral de P-2, P-5, P-8 y el promedio de CIR_9P de diámetro de 0.80 m para separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. La Gráfica 53 presenta curvas de desplazamiento lateral del pilote P-5 del grupo CIR_9P versus profundidad y la Gráfica 54 presenta curvas de momentos flectores internos del pilote P-8 del grupo CIR_9P versus profundidad para longitud de 45 m y separaciones 3D, 4D y 5D.

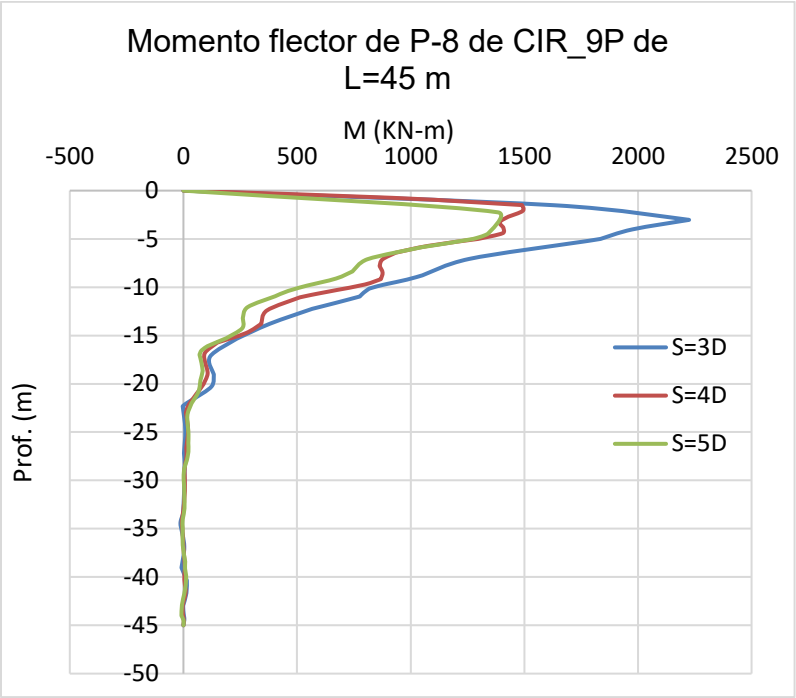
Tabla 60. Desplazamiento lateral (mm) De P-5, P-2, P-8 y CU_9P para D=0.40 m

	S=3D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	131.93	120.57	118.02	120.70
L35	192.36	174.75	172.47	175.69
L45	272.81	245.64	248.54	249.95
	S=4D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	109.18	97.33	95.43	97.80
L35	156.59	139.87	137.50	140.67
L45	217.26	193.23	192.30	195.49
	S=5D			
Pilote	P-5	P-2	P-8	CIR_9P
L25	95.18	82.75	84.53	84.92
L35	136.14	118.04	121.08	121.41
L45	187.66	168.22	167.81	170.20

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 53. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-5 de CIR_9P_D80_L45
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 54. Curvas de momento flector Vs prof. de P-8 CIR_9P_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.2.7 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a 200 KN de carga lateral

De los resultados obtenidos de los análisis mediante los métodos de elementos finitos 3D en Midas GTS NX para los grupos RE_2x2 ante la carga lateral de 200 KN, se consideraron los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de pilotes P-1 y P-4 y a partir de ellos, se determinan el desplazamiento lateral promedio de los grupos. También, de estos resultados se presentan curvas de desplazamiento lateral de los pilotes y de módulo de reacción del suelo presentando a lo largo del eje de los pilotes.

En las Tabla 61, Tabla 62 y Tabla 63 se presentan el desplazamiento lateral de P-1, P-4 y el promedio de RE_2x2 para pilotes de diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m respectivamente de separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. Las Gráfica 55, Gráfica 56 y Gráfica 57 muestran curvas de desplazamiento lateral del pilote P-4 del grupo RE_2x2 versus profundidad para diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m y longitudes de 25, 35, y 45 m respectivamente.

En las Gráfica 58, Gráfica 59 y Gráfica 60 se puede observar la variación del módulo de reacción horizontal del suelo presentado alrededor de los pilotes de los grupos RE_2x2 para pilotes de longitudes de 25, 35 y 45 m respectivamente al ser sometidos a cargas laterales.

Tabla 61. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	10.28	9.28	9.78	8.84	8.13	8.49	7.80	7.80	7.80
L35	10.29	9.29	9.79	8.83	8.13	8.48	7.79	7.34	7.57
L45	10.72	9.37	10.04	8.93	8.19	8.56	7.85	7.39	7.62

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m

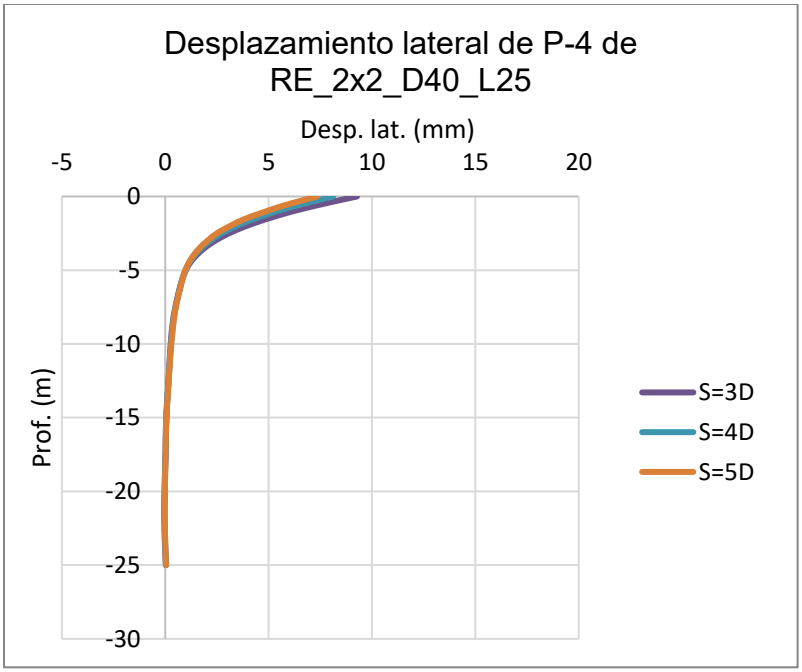
	S=3D			S=3D			S=3D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	6.19	6.23	6.21	5.81	5.49	5.65	5.47	4.89	5.18
L35	6.24	6.31	6.27	5.88	5.55	5.72	5.49	4.93	5.21
L45	6.36	6.42	6.39	5.99	5.64	5.82	5.51	5.01	5.26

Fuente: Elaboración propia

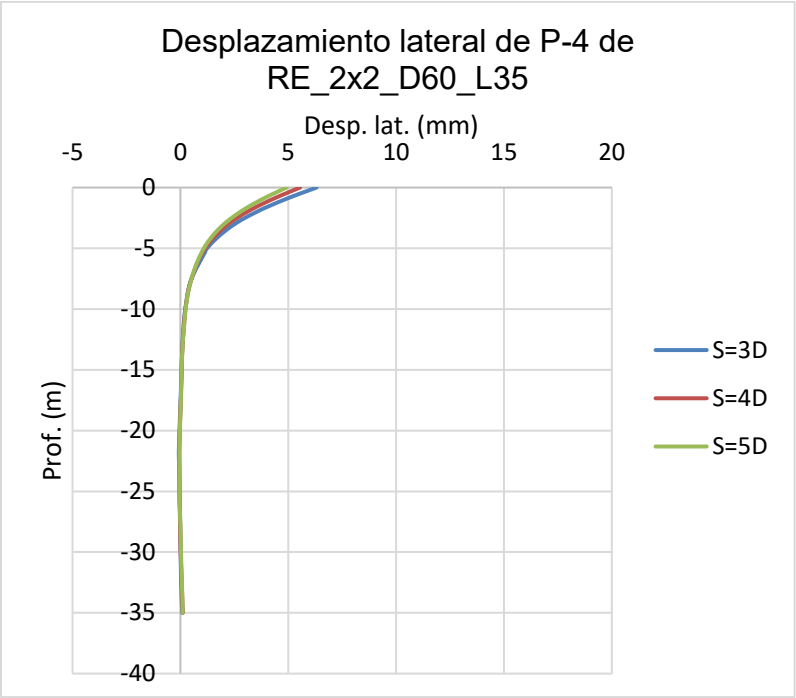
Tabla 63. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	4.65	4.92	4.79	4.10	4.48	4.29	3.78	4.17	3.97
L35	4.68	4.95	4.82	4.15	4.50	4.32	3.83	4.17	4.00
L45	4.70	4.95	4.83	4.16	4.50	4.33	3.84	4.17	4.00

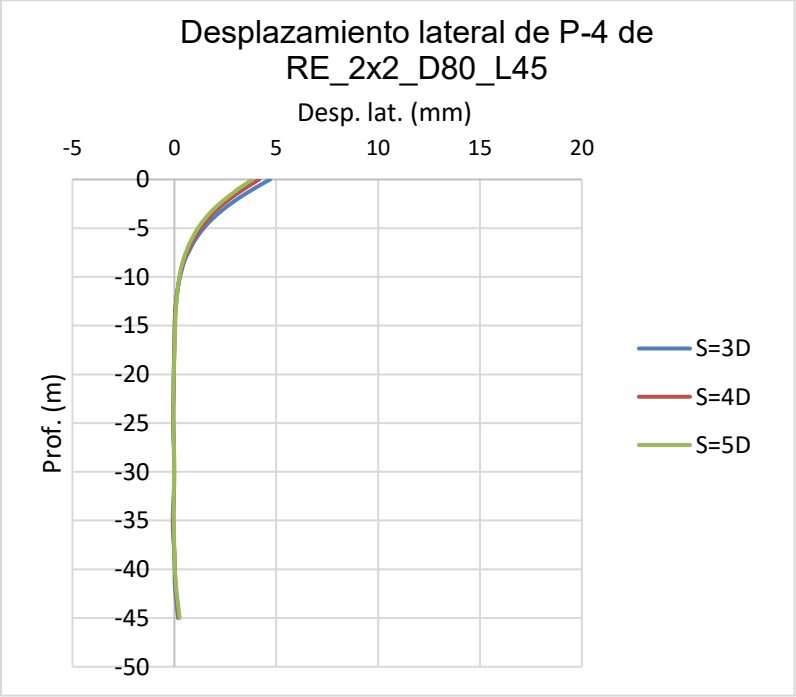
Fuente: Elaboración propia



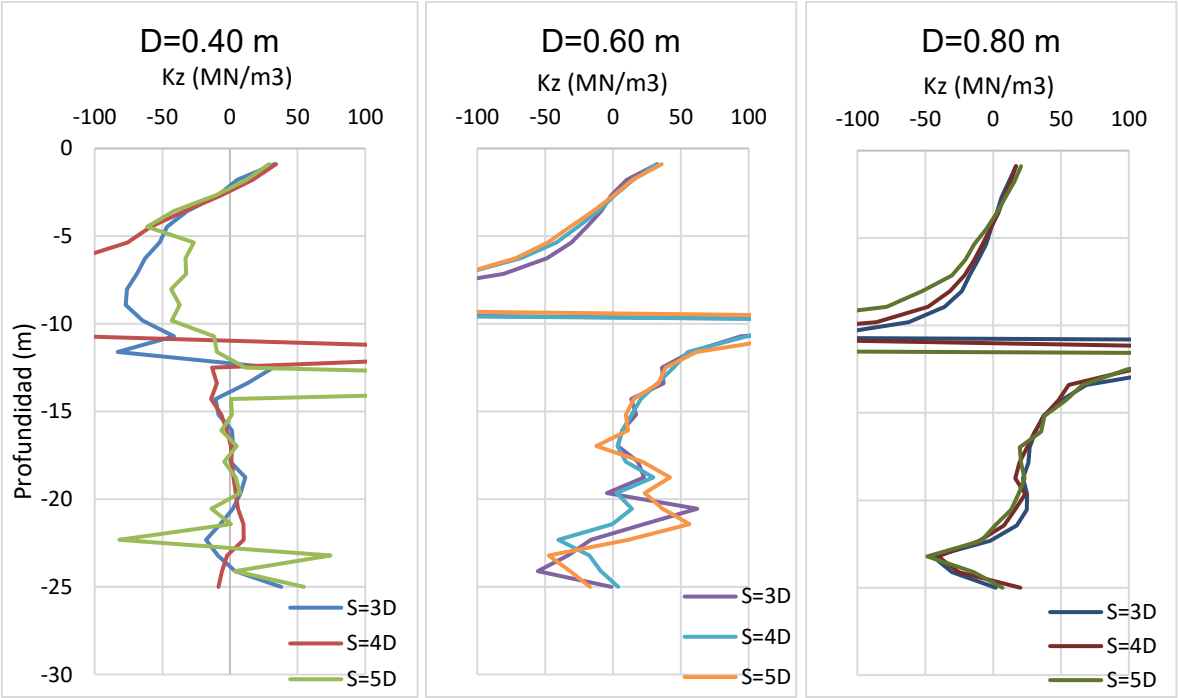
Gráfica 55. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



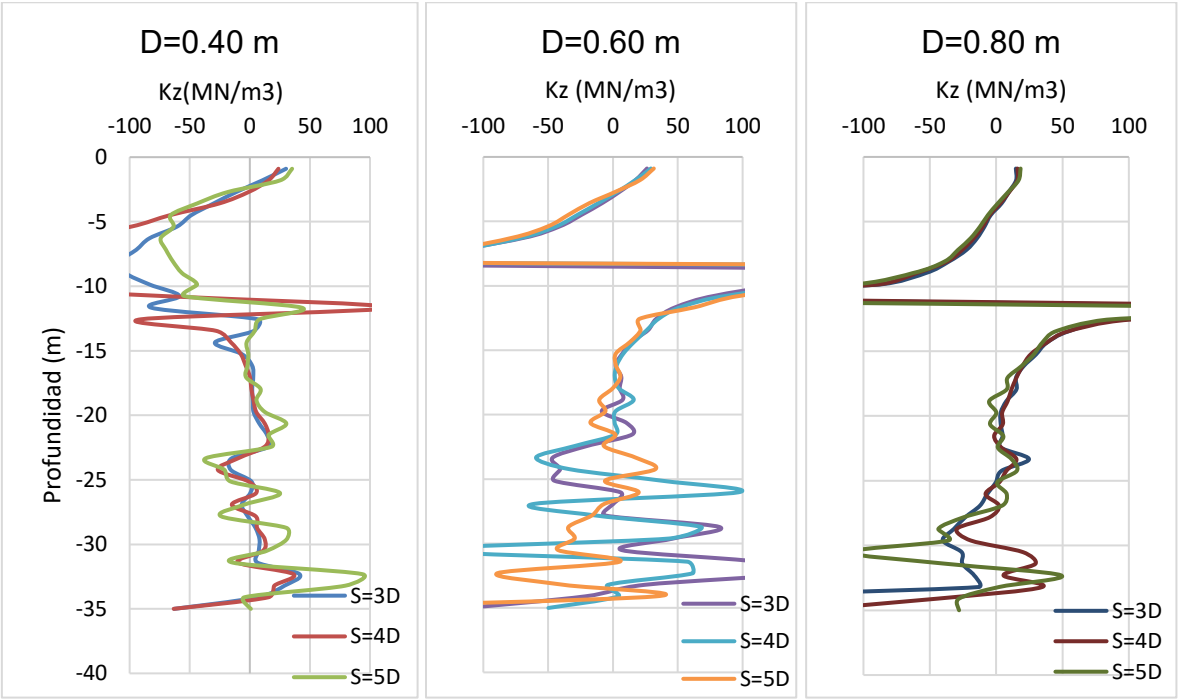
Gráfica 56. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



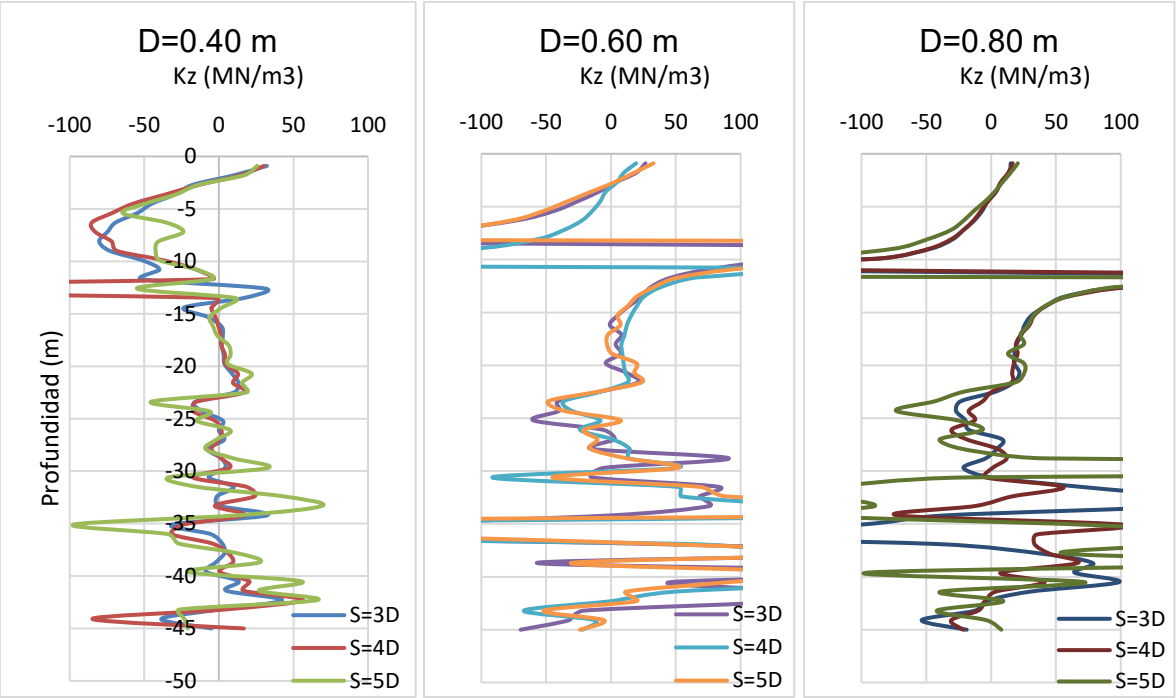
Gráfica 57. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L45
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 58. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 59. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 60. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L45
Fuente: Elaboración propia

5.2.8 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a 800 KN de carga lateral

De los resultados obtenidos de los análisis de modelos de elementos finitos 3D en el programa Midas GTS NX para los grupos RE_2x2 ante las cargas laterales de 800 KN, se presentan los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de pilotes P-1 y P-4 y a partir de ellos, se determinan el desplazamiento lateral promedio de los grupos. También, de estos resultados se pueden observar curvas de desplazamiento lateral de los pilotes y de módulo de reacción del suelo presentando a lo largo del eje de los pilotes.

Las Tabla 64, Tabla 65 y Tabla 66 presentan el desplazamiento lateral de P-1, P-4 y el promedio de RE_2x2 para pilotes de diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m respectivamente de separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. En las Gráfica 61, Gráfica 62 y Gráfica 63 se puede observar curvas de desplazamiento lateral del pilote P-4 del grupo RE_2x2 versus profundidad para diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m y longitudes de 25, 35, y 45 m respectivamente.

En las Gráfica 64 Gráfica 65 y Gráfica 66 se puede observar la variación del módulo de reacción horizontal del suelo presentado alrededor de los pilotes de los grupos RE_2x2 para pilotes de longitudes de 25, 35 y 45 m respectivamente al ser sometidos a cargas laterales.

Tabla 64. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	42.52	38.59	40.56	36.41	33.80	35.10	31.96	31.96	31.96
L35	42.54	38.60	40.57	36.31	33.80	35.06	31.94	30.54	31.24
L45	44.41	38.93	41.67	36.77	34.00	35.39	32.17	30.73	31.45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 65. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m

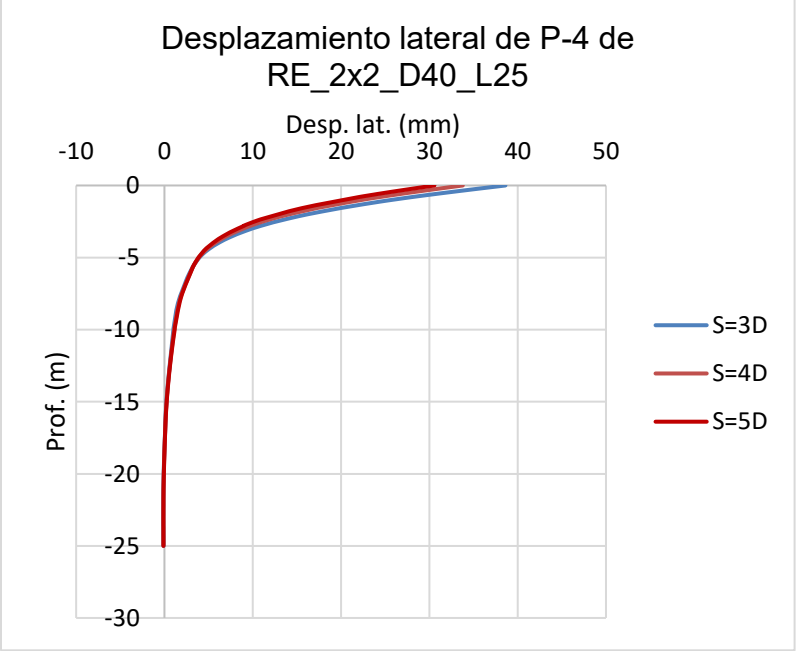
	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	25.67	25.11	25.39	22.65	23.33	22.99	20.27	21.89	21.08
L35	26.00	25.27	25.63	22.86	23.66	23.26	20.43	21.98	21.21
L45	27.58	25.79	26.68	23.30	24.09	23.69	20.80	22.09	21.45

Fuente: Elaboración propia

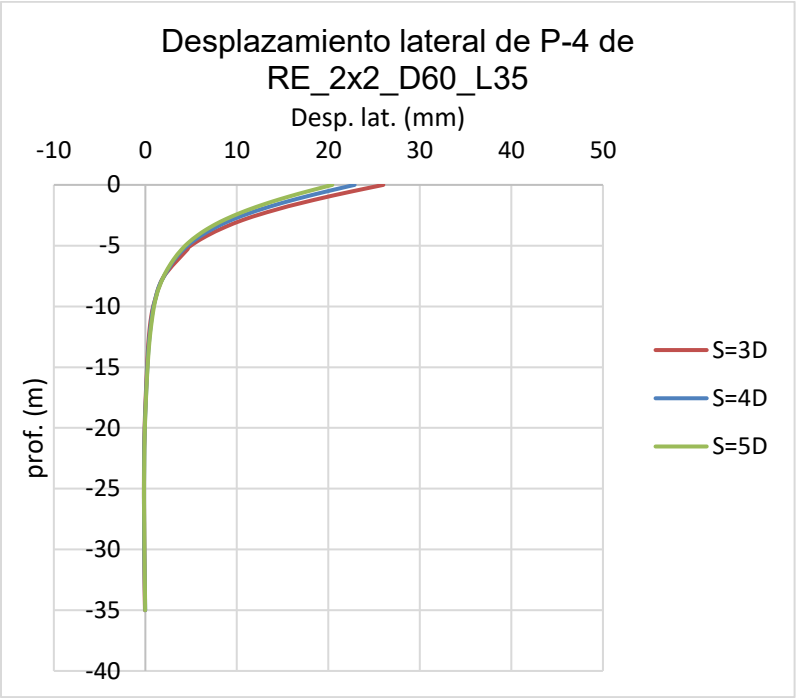
Tabla 66. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m

	S=3D			S=4D			S=5D		
Pilote	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	18.60	19.36	18.98	17.13	17.38	17.25	15.86	16.10	15.98
L35	18.85	19.59	19.22	17.34	17.55	17.44	16.01	16.21	16.11
L45	19.45	19.56	19.50	17.35	17.56	17.45	16.02	16.21	16.11

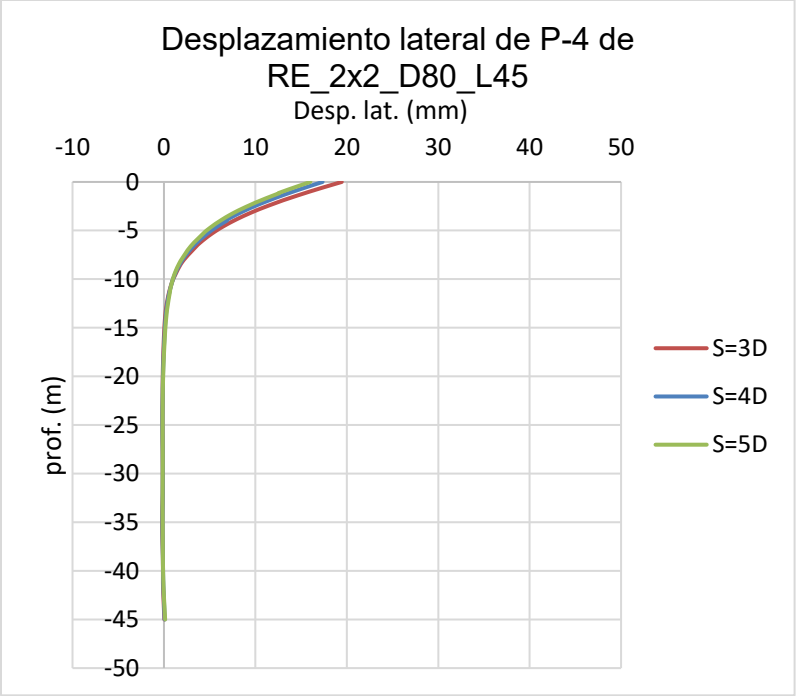
Fuente: Elaboración propia



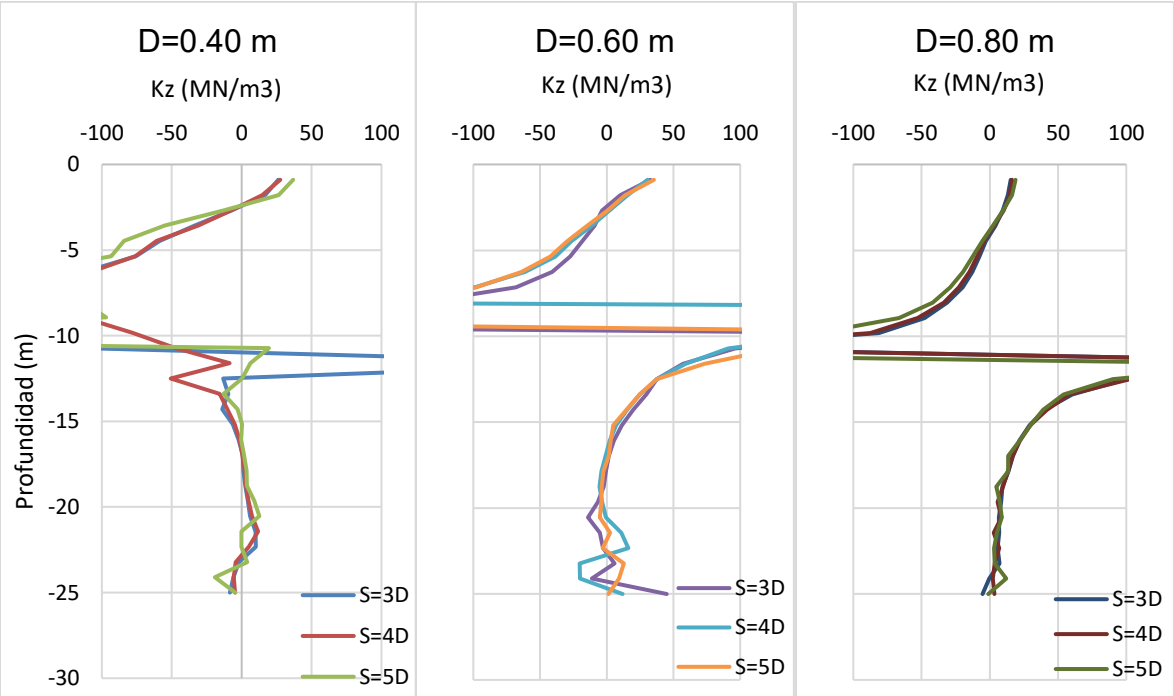
Gráfica 61. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



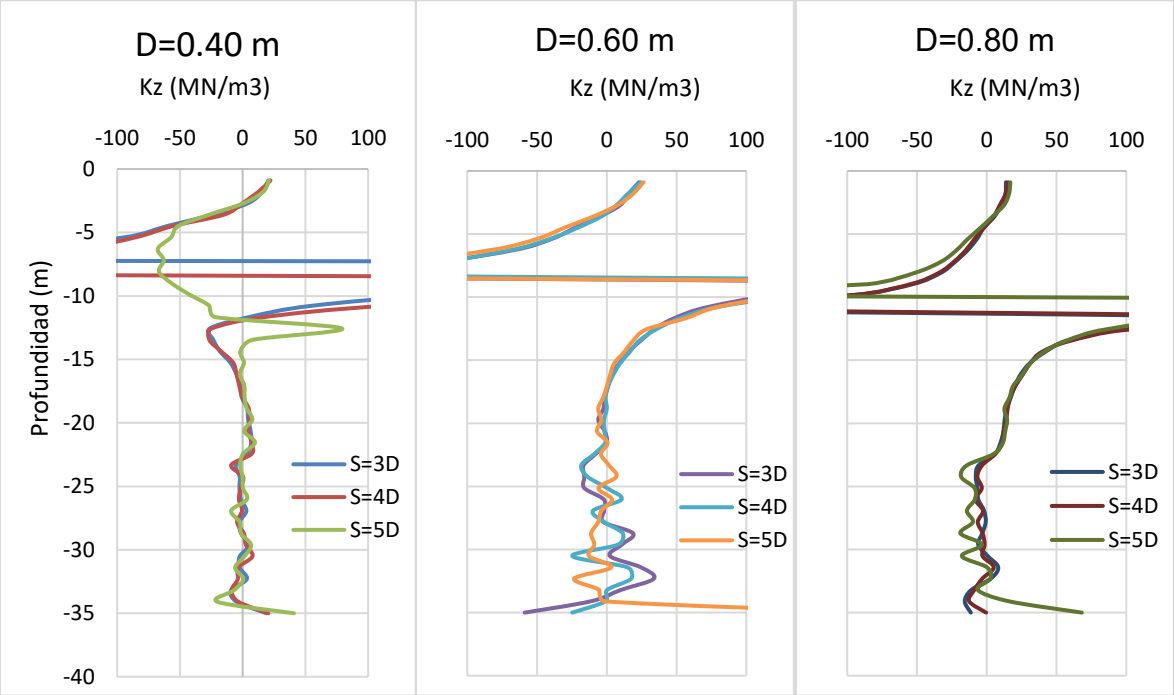
Gráfica 62. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



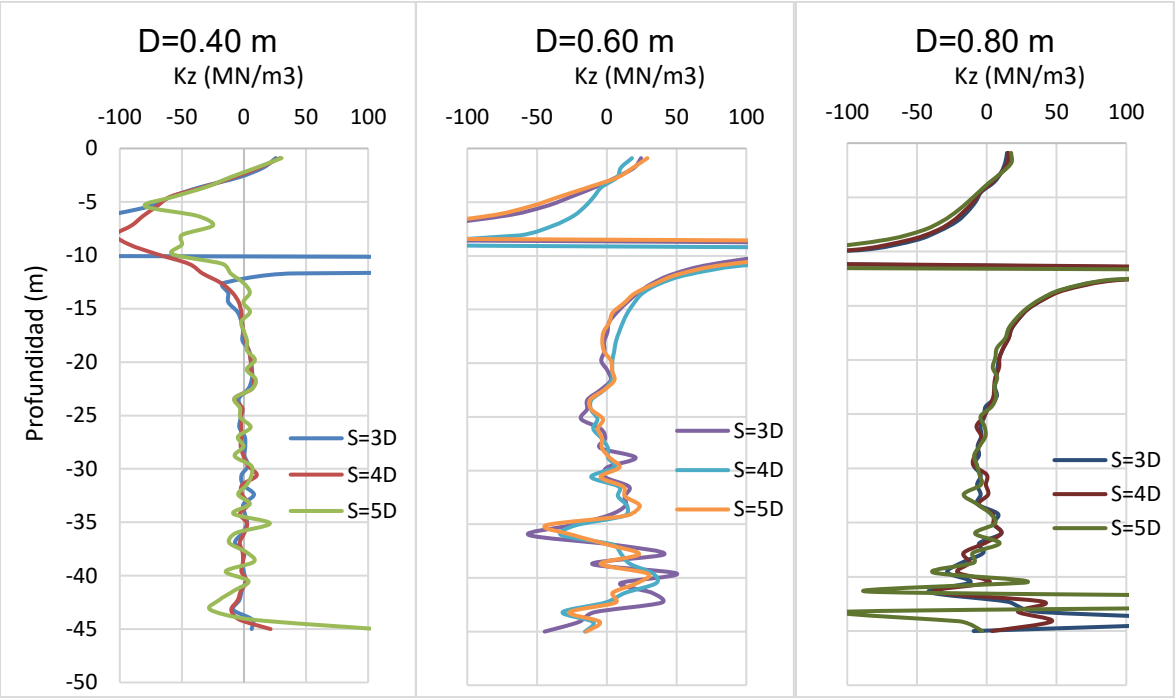
Gráfica 63. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 64. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 65. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 66. Módulo de reacción del suelo alrededor de pilotes de RE_2x2_L45
Fuente: Elaboración propia

5.3 GRUPOS DE PILOTES ANTE COMBINACIONES DE CARGAS VERTICALES Y LATERALES

Los resultados presentados a continuación son los desplazamientos laterales en las cabezas de pilotes de los grupos y promedios de los grupos que son sometidos a cargas verticales y laterales. Las cargas verticales aplicadas son la capacidad de caga última de los grupos.

De los resultados obtenidos de los análisis por medio de los métodos de elementos finitos 3D en Midas GTS NX para los grupos RE_2x2 ante las combinaciones de cargas, se presentan los desplazamientos laterales máximos en las cabezas de los pilotes P-1 y P-4 y a partir de ellos, se determinan el desplazamiento lateral promedio de los grupos.

5.3.1 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a cargas gravitacionales y a 200 KN de carga lateral

Las Tabla 67, Tabla 68 y Tabla 69 presentan el desplazamiento lateral de P-1, P-4 y el promedio de RE_2x2 para pilotes de diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m respectivamente de separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. En las Gráfica 67, Gráfica 68 y Gráfica 69 se puede observar curvas de desplazamiento lateral del pilote P-4 del grupo RE_2x2 versus profundidad para diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m y longitudes de 25, 35, y 45 m respectivamente.

Tabla 67. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m

Pilote	S=3D			S=4D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	11.18	7.84	9.51	10.21	6.61	8.41	9.56	5.50	7.53
L35	11.46	7.95	9.71	10.41	6.71	8.56	9.67	5.57	7.62
L45	11.44	8.30	9.87	10.09	7.20	8.65	9.44	5.98	7.71

Fuente: Elaboración propia

Tabla 68. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m

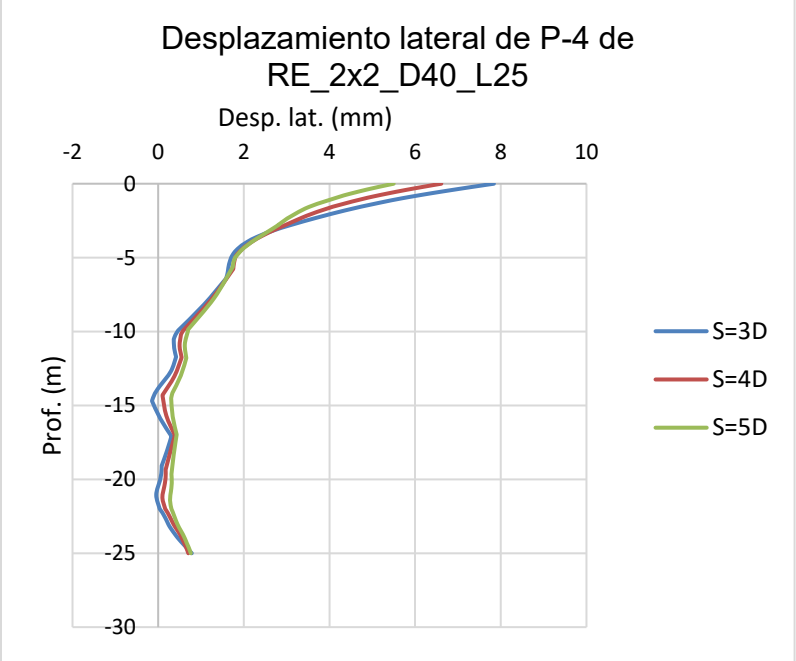
Pilote	S=3D			S=4D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	7.31	5.46	6.38	7.36	4.64	6.00	7.01	3.63	5.32
L35	7.33	5.34	6.33	7.57	4.44	6.01	7.19	3.45	5.32
L45	7.52	5.37	6.45	7.86	4.33	6.10	7.35	3.30	5.32

Fuente: Elaboración propia

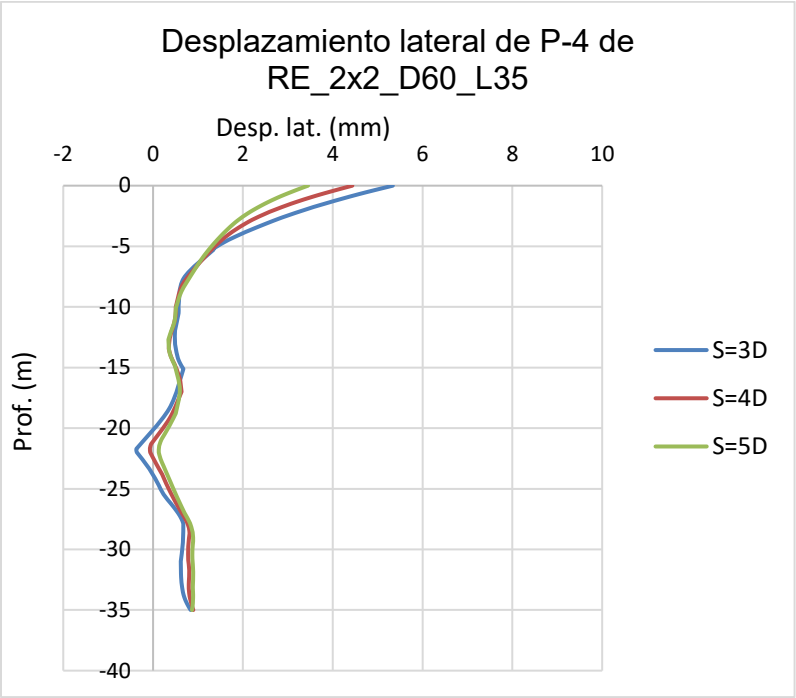
Tabla 69. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m

Pilote	S=3D			S=4D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	6.45	3.74	5.09	6.35	2.85	4.60	6.05	2.50	4.28
L35	6.50	3.59	5.04	6.42	2.82	4.62	6.00	2.59	4.29
L45	6.78	3.34	5.06	6.79	2.58	4.69	6.31	2.41	4.36

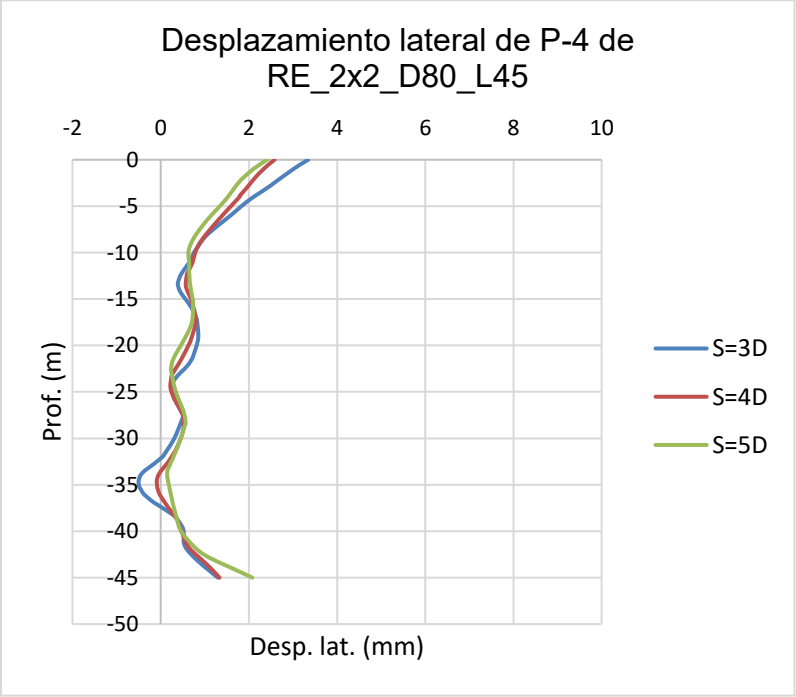
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 67. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 68. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 69. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Grupos de pilotes rectangular RE_2x2 sometidos a cargas gravitacionales y a 800 KN de carga lateral

Las Tabla 70, Tabla 71 y Tabla 72 presentan el desplazamiento lateral de P-1, P-4 y el promedio de RE_2x2 para pilotes de diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m respectivamente de separaciones de 3D, 4D y 5D, y longitudes de 25, 35 y 45 m. En las Gráfica 70, Gráfica 71 y Gráfica 72 se puede observar curvas de desplazamiento lateral del pilote P-4 del grupo RE_2x2 versus profundidad para diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m y longitudes de 25, 35, y 45 m respectivamente.

Tabla 70. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.40 m

Pilote	S=3D			S=4D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	42.58	36.74	39.66	37.35	32.08	34.72	33.21	28.50	30.85
L35	43.20	36.81	40.01	37.50	32.08	34.79	33.29	28.49	30.89
L45	44.40	37.36	40.88	37.49	32.71	35.10	33.30	28.95	31.12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 71. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.60 m

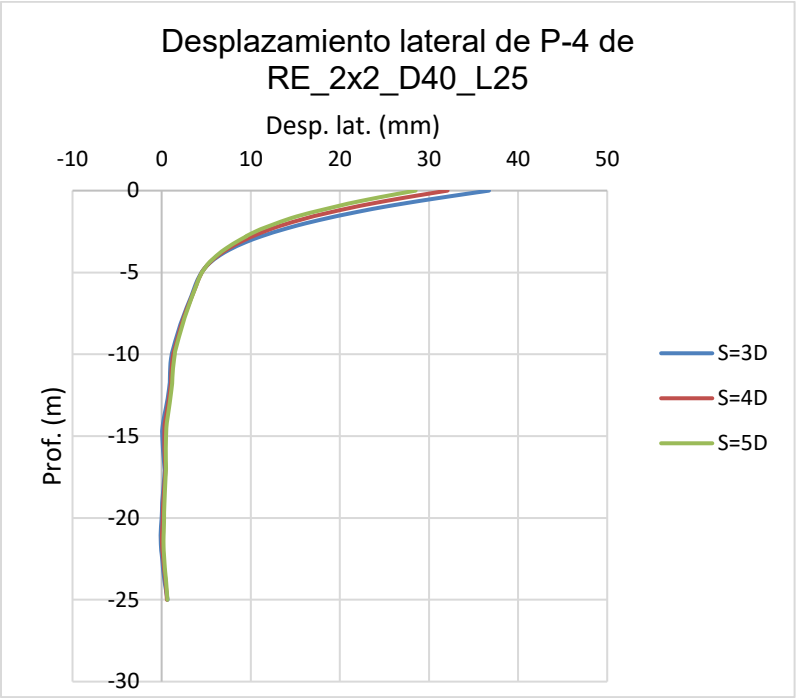
Pilote	S=3D			S=4D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	25.94	24.60	25.27	24.63	21.60	23.12	23.16	18.84	21.00
L35	26.13	24.74	25.44	25.06	21.56	23.31	23.38	18.78	21.08
L45	26.69	25.08	25.88	25.63	21.71	23.67	23.59	18.86	21.22

Fuente: Elaboración propia

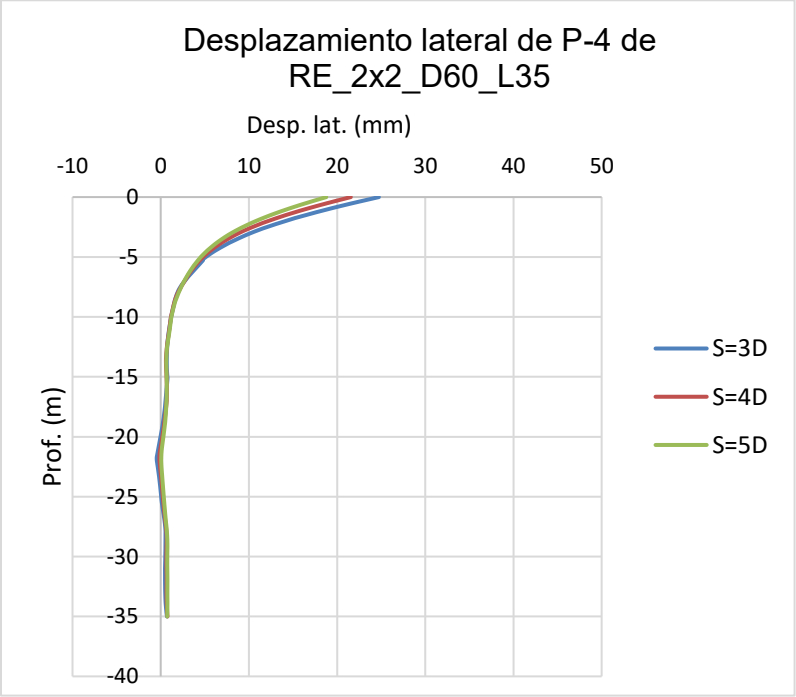
Tabla 72. Desplazamiento lateral (mm) De P-1, P-4 y RE_2x2 para D=0.80 m

Pilote	S=3D			S=4D			S=5D		
	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2	P-1	P-4	RE_2x2
L25	20.74	18.20	19.47	19.12	15.78	17.45	17.86	14.49	16.18
L35	20.93	18.17	19.55	19.32	15.87	17.60	17.91	14.63	16.27
L45	21.23	17.93	19.58	19.68	15.63	17.66	18.20	14.48	16.34

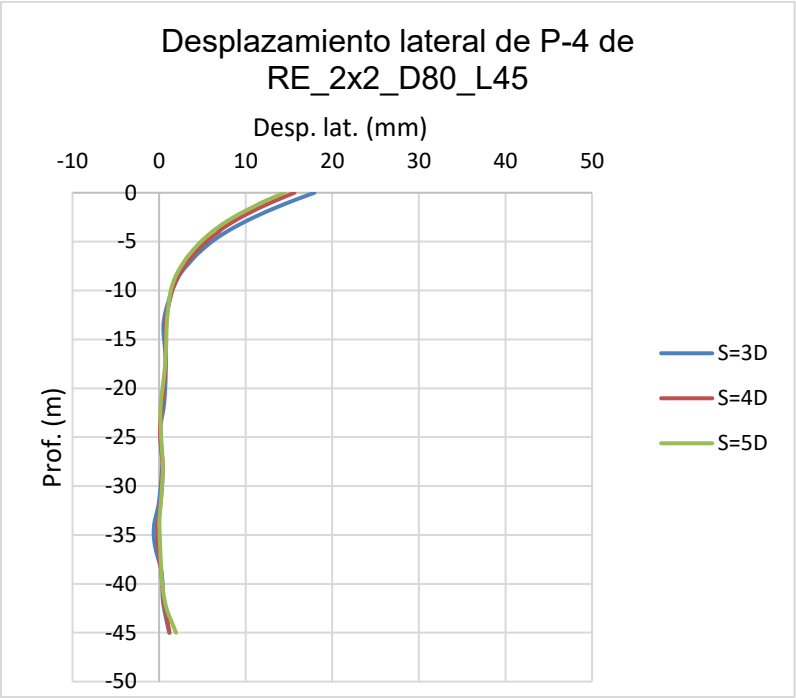
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 70. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D40_L25
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 71. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D60_L35
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 72. Curvas de desp. lat. Vs prof. de P-4 de RE_2x2_D80_L45
Fuente: Elaboración propia

5.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

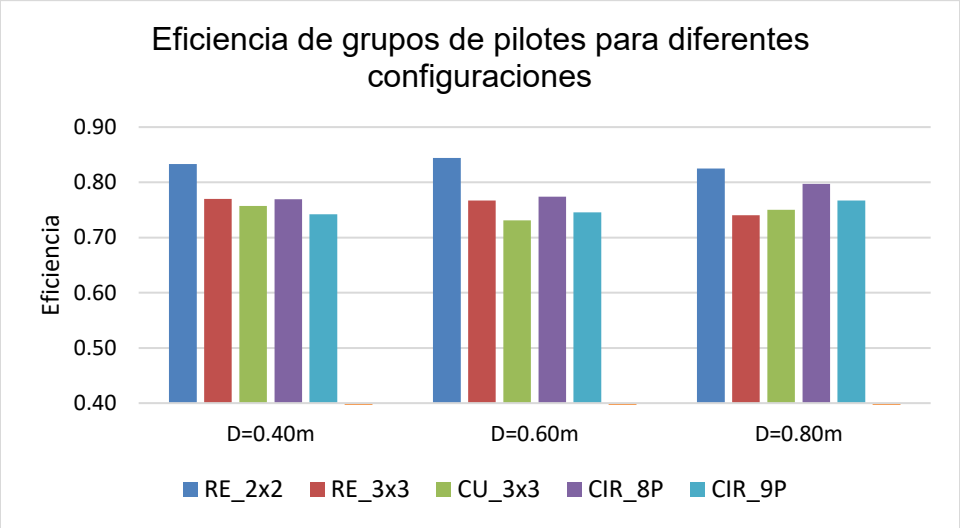
Los resultados a continuación presentan la influencia de los parámetros, configuración de grupos, espaciamiento entre pilotes, diámetro y longitud de pilotes, en la respuesta mecánica de los grupos de pilotes estudiados en el perfil geotécnico promedio de los suelos arcillosos lacustres de Bogotá por medio de métodos de elementos finitos en 3 dimensiones en el programa Midas GTS NX. En primer lugar, se presenta el análisis de los parámetros para la eficiencia de los grupos bajo cargas gravitacionales. En segundo lugar, se presenta la influencia de los parámetros en los desplazamientos verticales promedios de los grupos de pilotes generados por las cargas gravitacionales. Luego, se presenta la influencia de los parámetros en los desplazamientos laterales promedios de los grupos de pilotes generados por las cargas laterales. En cuarta lugar, se presenta el análisis de efectos de los parámetros para los esfuerzos de flexión en los pilotes y éstos se obtienen al dividir el momento de flector entre el módulo de sección de los pilotes. Por último, se analizan los resultados de módulo de reacción del suelo para diferentes profundidades del perfil geotécnico.

5.4.1 Eficiencia de grupos de pilotes

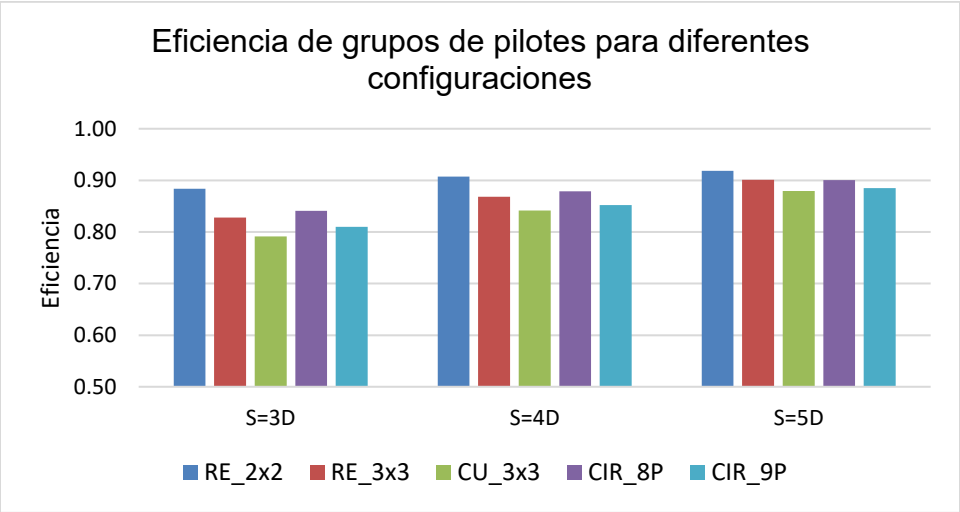
Configuración de grupos

De la Gráfica 73 a la Gráfica 74, se puede observar algunas comparaciones de eficiencia de grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales para las diferentes configuraciones analizadas en este estudio.

Los resultados de los análisis de métodos de elementos finitos realizados en Midas GTS NX muestran que los grupos de pilotes que generalmente tienen la mayor eficiencia son los grupos de configuración RE_2X2 y luego siguen los grupos de CIR_8P y RE_3x3. Los resultados de las comparaciones demuestran que, en los suelos lacustres de Bogotá, al aumentar el número de pilotes en un grupo disminuye la capacidad de carga última de los pilotes del grupo y por lo cual se reduce la eficiencia del grupo. Otra observación, es la comparación de eficiencia de grupos que contienen el mismo número de pilotes donde los resultados muestran que los grupos de forma circular tienen una mejor eficiencia que los grupos rectangulares o cuadriculares y eso es debido a que por dentro de los primeros hay un mayor espaciamiento y se puede observar mejor este efecto en la sección de Separación S entre pilotes de este apartado.



Gráfica 73. Eficiencia de grupos de pilotes para diferentes configuraciones con S=4D y L=25 m
Fuente: Elaboración propia

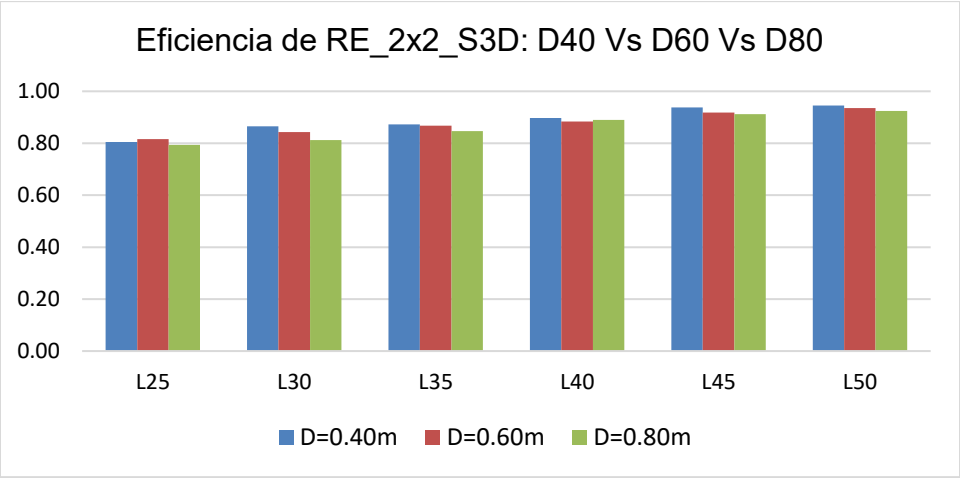


Gráfica 74. Eficiencia de grupos de pilotes para diferentes configuraciones con D=0.60 m y L=40 m
Fuente: Elaboración propia

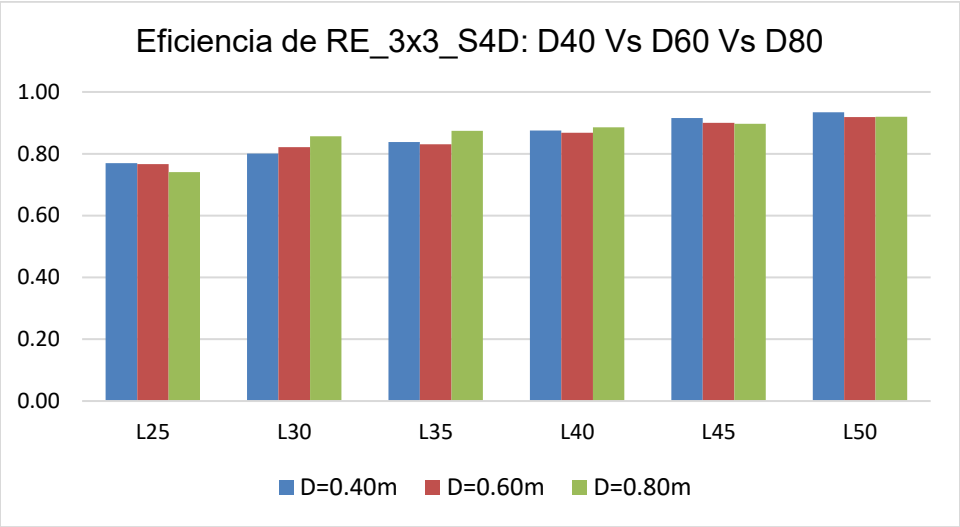
Diámetro D de pilotes

De las Gráfica 75 y Gráfica 77, se presentan una comparación de diámetros de 0.40, 0.60 y 0.80 m para eficiencia de grupos de pilotes RE_2x2, RE_3x3 y CIR_8P para separaciones entre pilotes de 3D, 4D y 5D respectivamente.

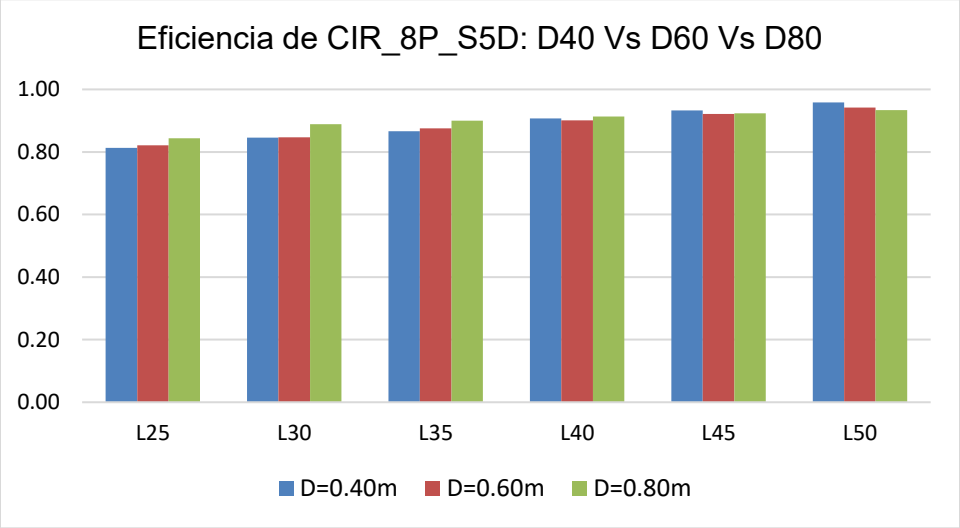
Los resultados de comparaciones de eficiencia de los grupos de pilotes bajo las cargas gravitacionales para los diferentes diámetros muestran que no hay un efecto significativo del parámetro. Como se puede observar en las siguientes gráficas, no solamente muestra que la diferencia de eficiencia de los grupos para un diámetro de pilotes a otro es muy pequeña, también, muestran que no hay una tendencia que demuestra que al aumentar el diámetro de los pilotes aumenta o disminuye la eficiencia de los grupos de pilotes.



Gráfica 75. Eficiencia de RE_2x2_S3D para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 76. Eficiencia de RE_3x3_S4D para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia

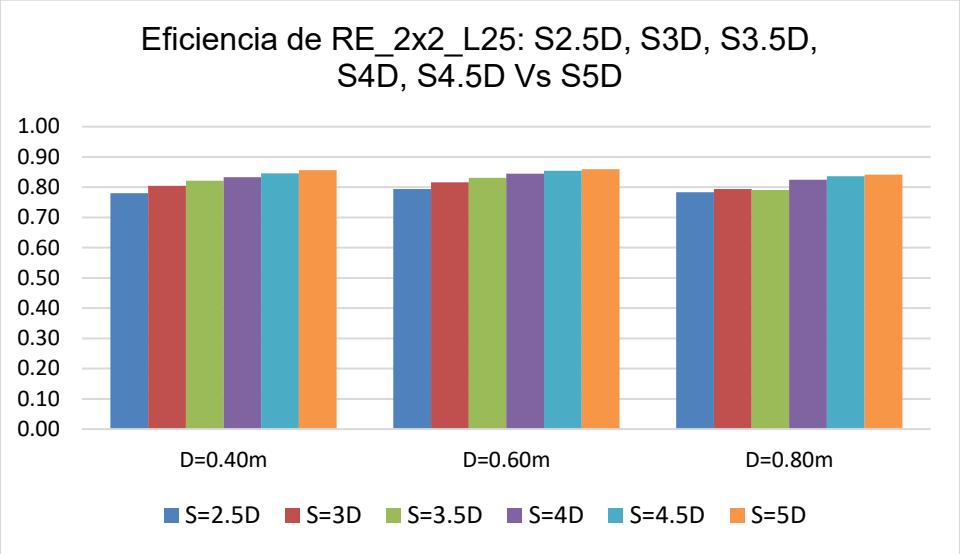


Gráfica 77. *E*ficiencia de CIR_8P_S5D para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia

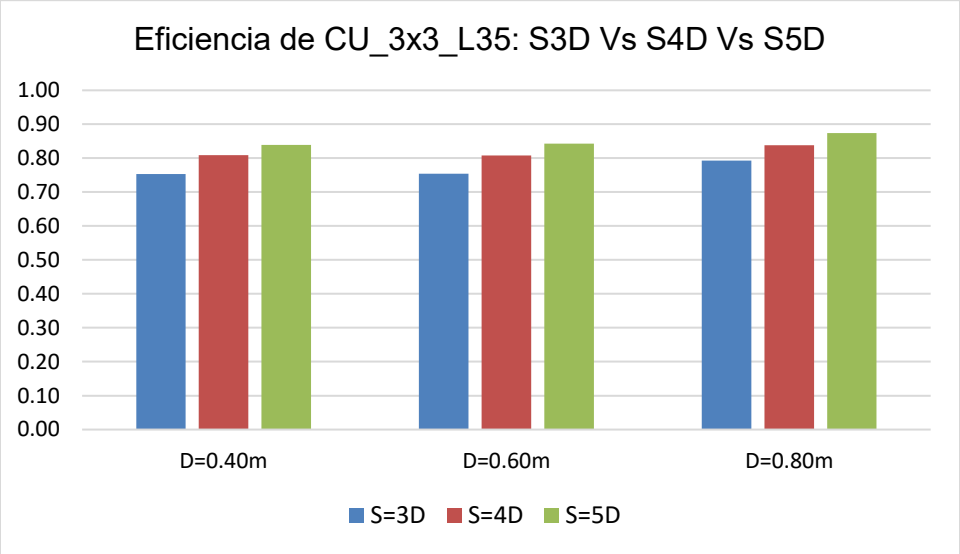
Separación S entre pilotes

Las gráficas de comparaciones presentadas a continuación (Gráfica 78 y Gráfica 79) para los valores del parámetro separación demuestran que es un parámetro significativo para la eficiencia de los grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales ya que con mayor separación entre los pilotes aumenta la eficiencia de los grupos. La eficiencia se aumenta hasta un 3.70 % para los grupos RE_2x2 y hasta 13.35 % para los grupos de 8 y 9 pilotes al cambiar la separación de S=3D a S=4D, al usar la separación S=5D en lugar de S=4D, la eficiencia de los grupos RE_2x2 se aumenta hasta un 2.70 % mientras para los grupos de 8 y 9 pilotes se incrementa hasta 10.77 %.

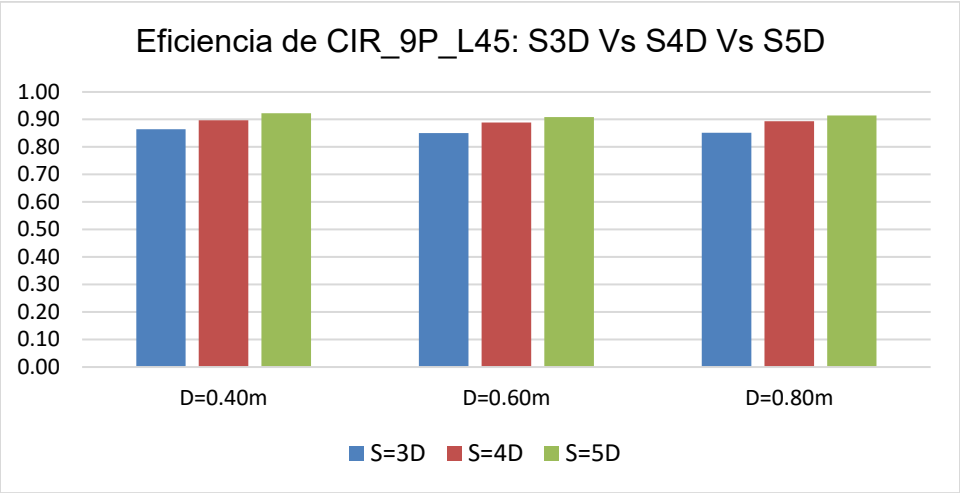
También, los resultados de eficiencia de los grupos de pilotes muestran, para el parámetro S, que hay una diferencia más significativa de eficiencia para los grupos de pilotes de menor longitud en el perfil de suelos lacustres de Bogotá, lo que demuestra que es menos efectivo el parámetro S cuando los pilotes se encuentran en suelos más resistentes.



Gráfica 78. Eficiencia de RE_2x2_L25 para las separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 79. Eficiencia de CU_3x3_L35 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia

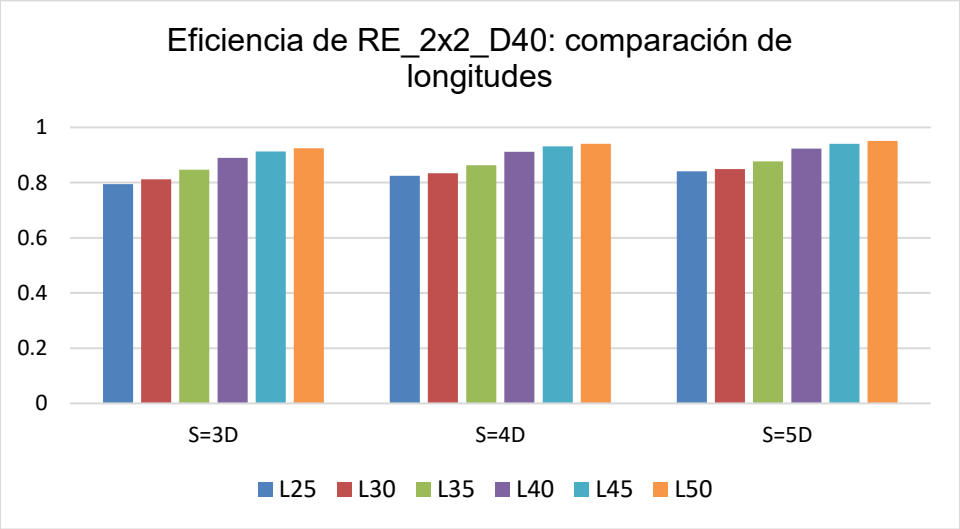


Gráfica 80. Eficiencia de CIR_9P_L45 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia

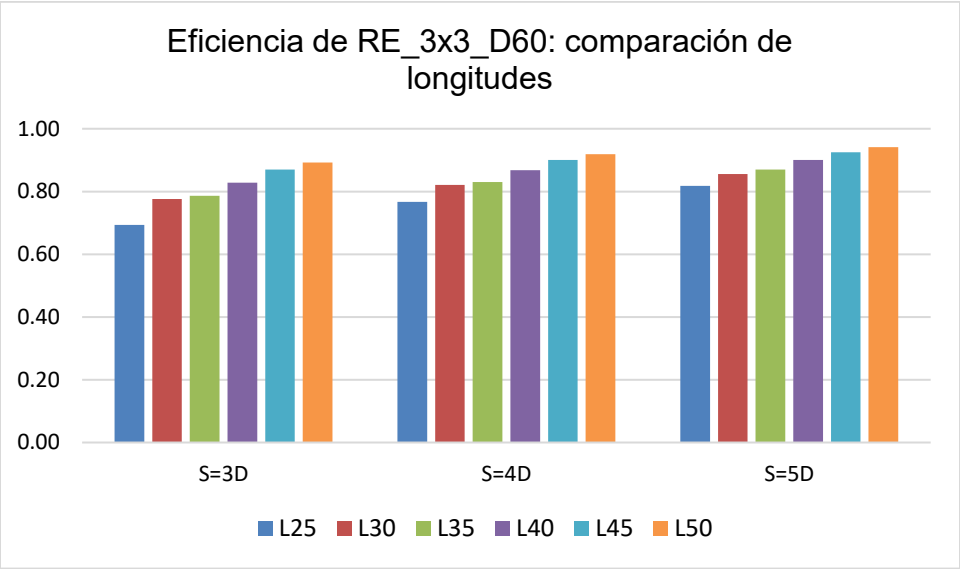
Longitud L de pilotes

Los resultados de eficiencia de los grupos de pilotes en el perfil de suelos lacustres de Bogotá muestran que cuando los pilotes tengan mayor longitud como 45 y 50 m, lo que significa que una gran parte de su longitud se encuentra en una capa de suelos más resistente, aumenta la eficiencia para la capacidad de cargas gravitacionales.

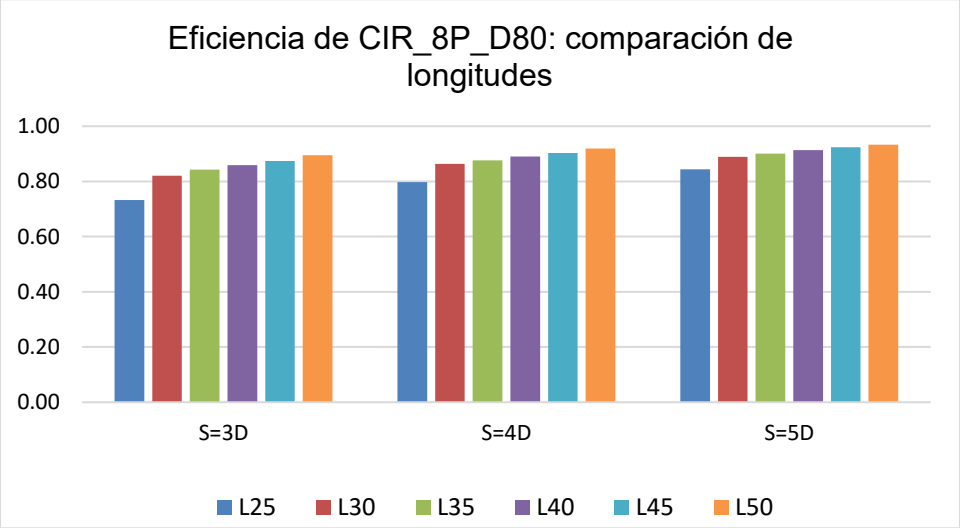
En las Gráfica 81, Gráfica 82 y Gráfica 83 se pueden observar que con el aumento de longitud se aumenta la eficiencia de los grupos de pilotes en los suelos arcillosos del lacustre de Bogotá. los resultados muestran que, para un incremento de 5 m de longitud, la eficiencia se aumenta hasta un 7.09 % para los grupos RE_2x2 y hasta un 12 % para los otros grupos analizados.



Gráfica 81. Eficiencia de RE_2x2_D40 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 82. Eficiencia de RE_3x3_D60 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia

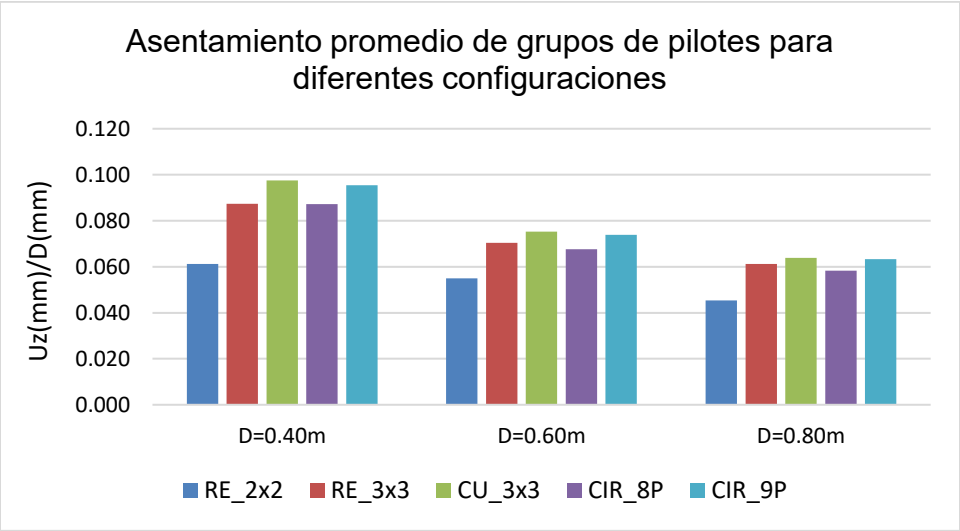


Gráfica 83. Eficiencia de CIR_8P_D80 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia

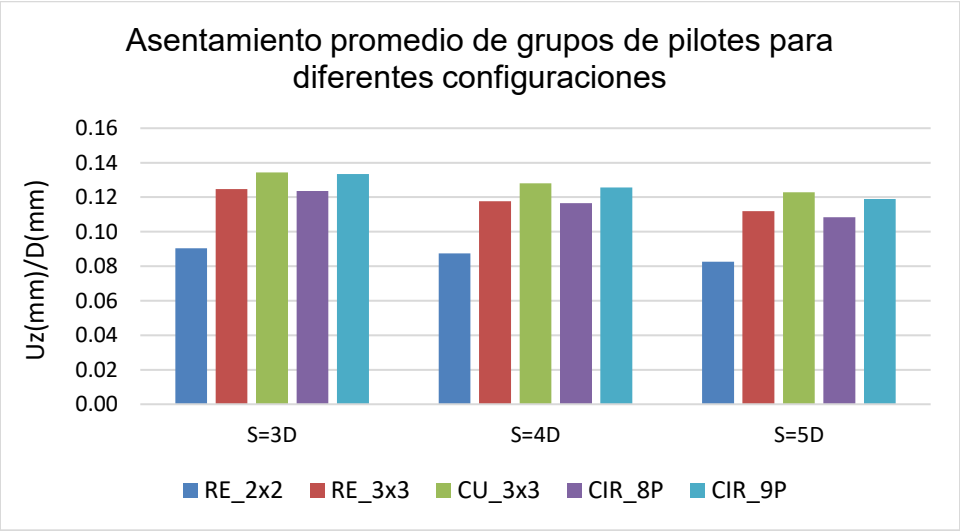
5.4.2 Desplazamientos verticales promedio de grupos de pilotes

Configuración de grupos

En las Gráfica 84 y Gráfica 85 se puede observar algunas comparaciones de desplazamiento vertical promedio normalizado con el diámetro de grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales para las diferentes configuraciones analizadas en este estudio.



Gráfica 84. Asentamiento promedio (Uz/D) para las configuraciones con S=4D y L=25 m
Fuente: Elaboración propia



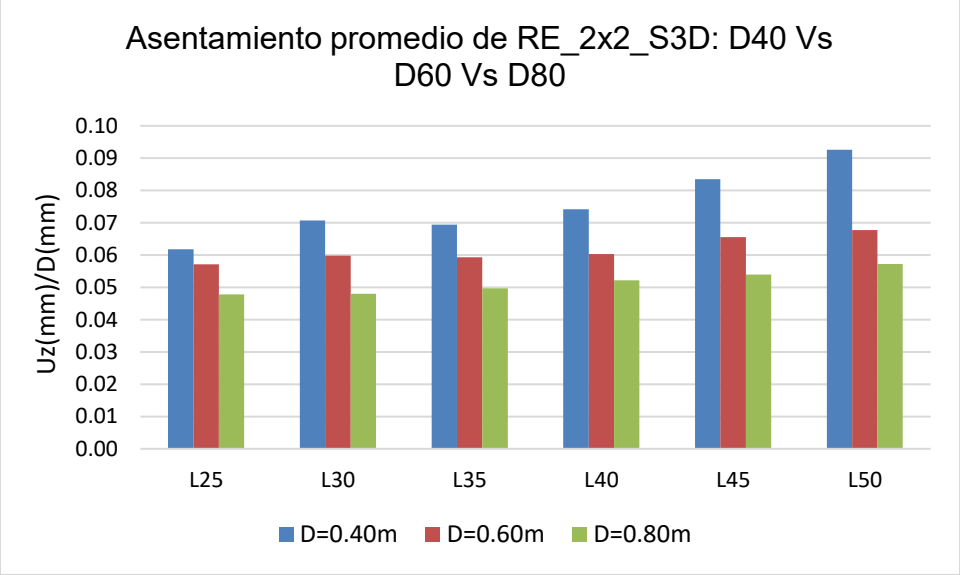
Gráfica 85. Asentamiento promedio (Uz/D) para las configuraciones con D=0.60 m y L=40 m
Fuente: Elaboración propia

Al observar los resultados de asentamiento promedio normalizada para las diferentes configuraciones, se puede ver que, en todos los casos, son los grupos RE_2x2 que tienen menos desplazamiento vertical en la cabeza, y luego siguen los grupos CIR_8P y RE_3x3. Al igual que los resultados de eficiencia, con el aumento de número de pilotes en un grupo disminuye su respuesta mecánica de no desplazarse verticalmente y por lo cual se aumenta el asentamiento en el extremo superior de los pilotes del grupo.

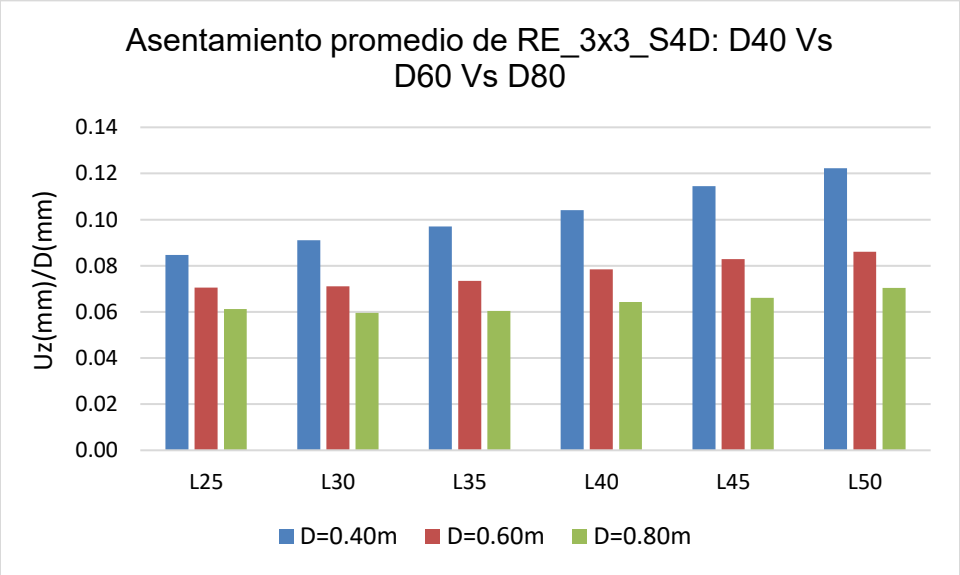
Diámetro D de pilotes

Las Gráfica 86 y Gráfica 87 gráficas muestran comparaciones de asentamientos normalizada con el diámetro de los pilotes para grupos RE_2x2 y RE_3x3 respectivamente.

En las gráficas se puede observar que los grupos con pilotes de diámetro de 0.80 m son los que tienen menos asentamiento y luego los grupos con pilotos de diámetros de 0.60 m. En general, los resultados demuestran que se disminuye el desplazamiento vertical promedio normalizado con el diámetro de los grupos de pilotes al usar pilotes de mayor sección. En este sentido, el asentamiento normalizado se reduce hasta un 30 % al aumentar el diámetro de 0.40 m a 0.60 m y hasta un 20 % al usar diámetro de 0.80 m en lugar de 0.60 m.



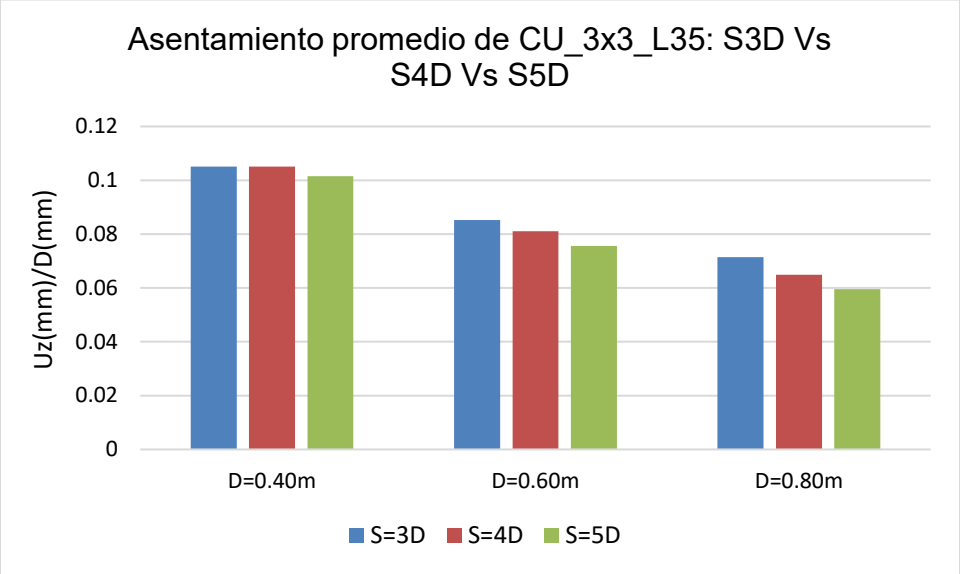
Gráfica 86. Asentamiento promedio (Uz/D) de RE_2x2_S3D para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia



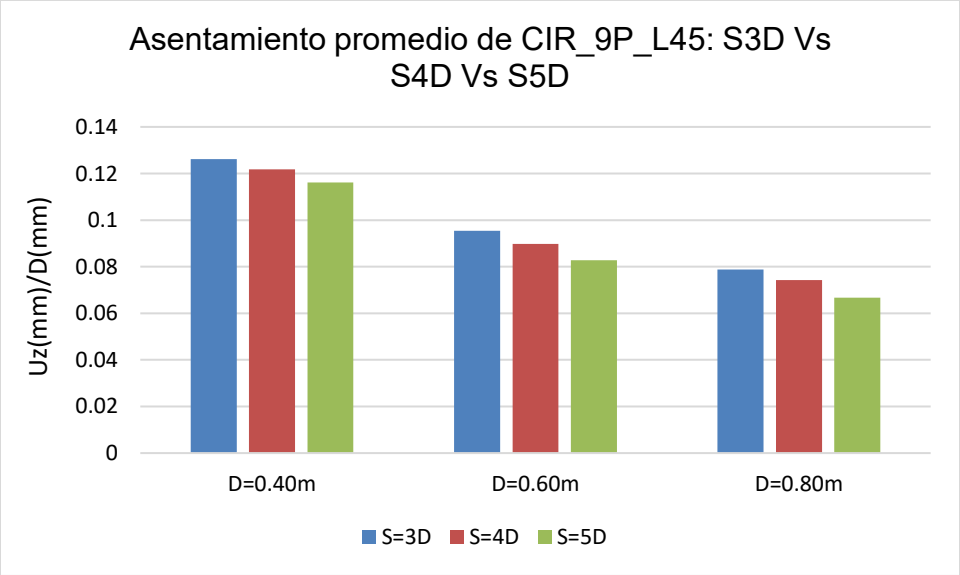
Gráfica 87. Asentamiento promedio (Uz/D) de CIR_8P_S4D para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia

Separación S entre pilotes

Al evaluar el efecto de las separaciones entre pilotes en los resultados de asentamiento promedio de los para los diferentes grupos de pilotes analizados, los resultados de comparaciones demuestran que se reduce el desplazamiento vertical en los pilotes al aumentar la separación entre ellos como se puede apreciar en las Gráfica 88 y Gráfica 89 para grupos de pilotes CU_3x3 y CIR_9P respectivamente. El incremento de 1D a la separación S entre los pilotes genera de un 3 % hasta un 12 % de reducción de asentamiento vertical promedio para los grupos de pilotes estudiados.



Gráfica 88. Asentamiento promedio (Uz/D) de CU_3x3_L35 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia

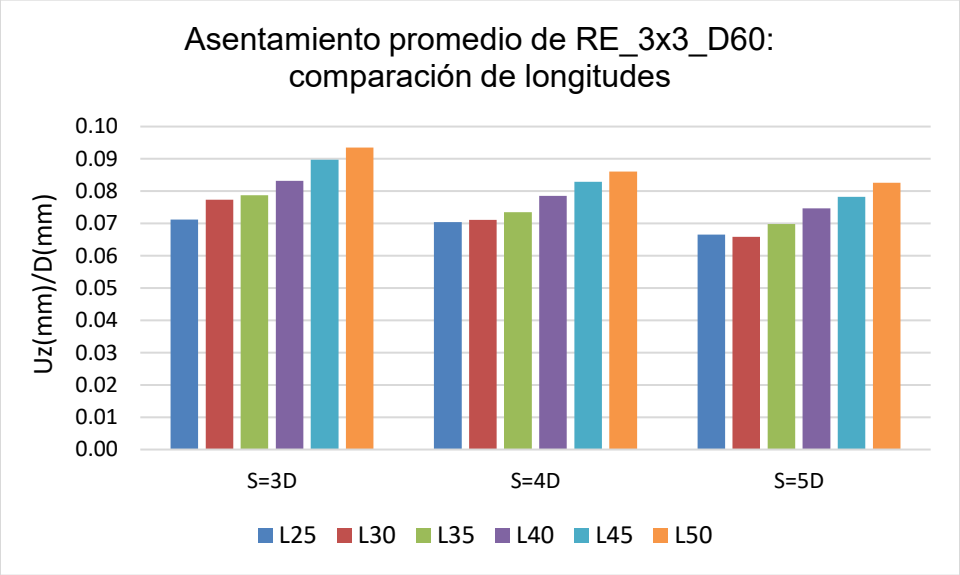


Gráfica 89. Asentamiento promedio (Uz/D) de CIR_9P_L45 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia

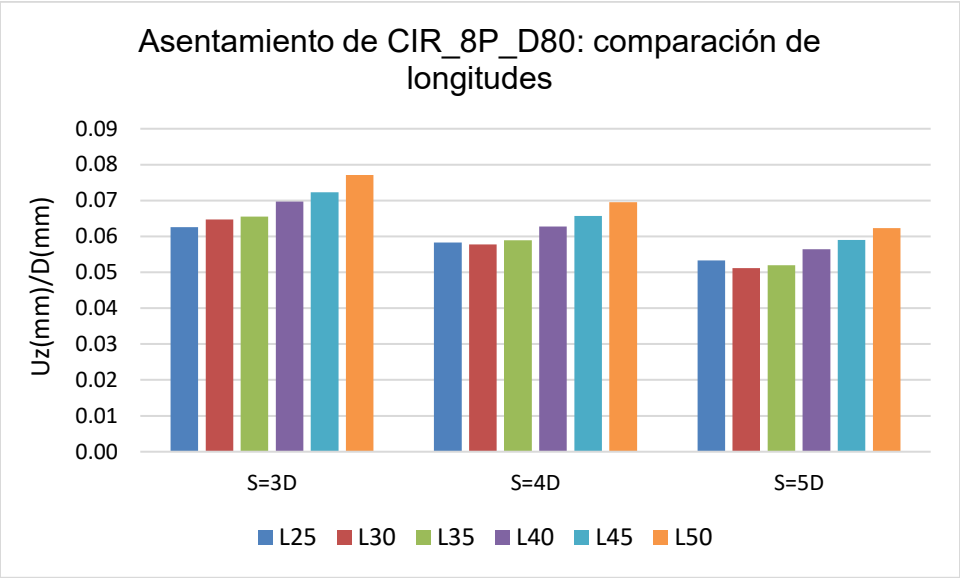
Longitud L entre pilotes

Las Gráfica 90 y Gráfica 91 presentan comparaciones de longitud de pilotes para el desplazamiento vertical promedio normalizado con el diámetro de los grupos con pilotes, RE_3x3 y CIR_8P respectivamente, sometidos a carga verticales. En las gráficas se puede apreciar que los grupos de los pilotes de mayor longitud son aquellos que tienen mayor desplazamiento vertical promedio y es la tendencia que se muestran en todos los resultados de desplazamiento vertical de los grupos de pilotes.

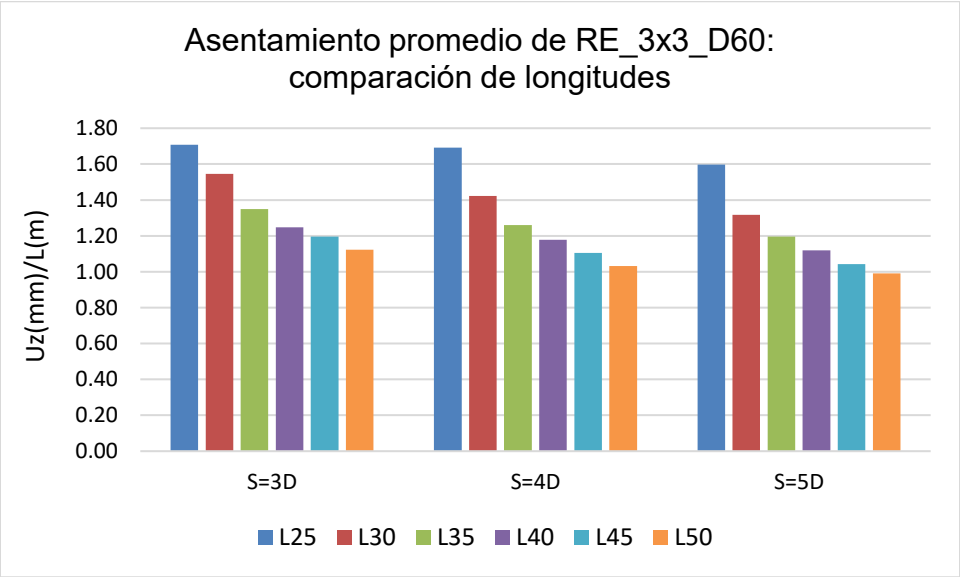
No obstante, al evaluar el parámetro de longitud de pilotes para el desplazamiento vertical promedio normalizado con la longitud de los pilotes, los resultados demuestran que se disminuye el asentamiento promedio por unidad de longitud de pilotes para grupos con pilotes que se encuentran en mayor profundidad en el perfil geotécnico representativo de los suelos arcillosos del depósito lacustre de Bogotá. En las Gráfica 92 y Gráfica 93 se puede ver las comparaciones del parámetro longitud de pilotes para el desplazamiento vertical promedio normalizado con la longitud para los grupos RE_3x3 y CIR_8P respectivamente.



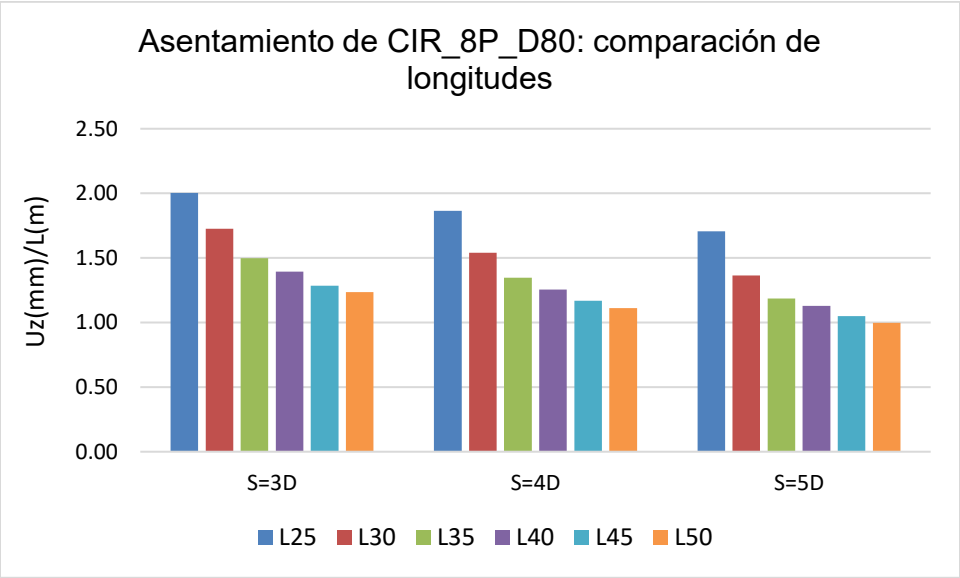
Gráfica 90. Asentamiento promedio (Uz/D) de RE_3x3_D60 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 91. Asentamiento promedio (Uz/D) de CIR_8P_D80 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 92. Asentamiento promedio (Uz/L) de RE_3x3_D60 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia

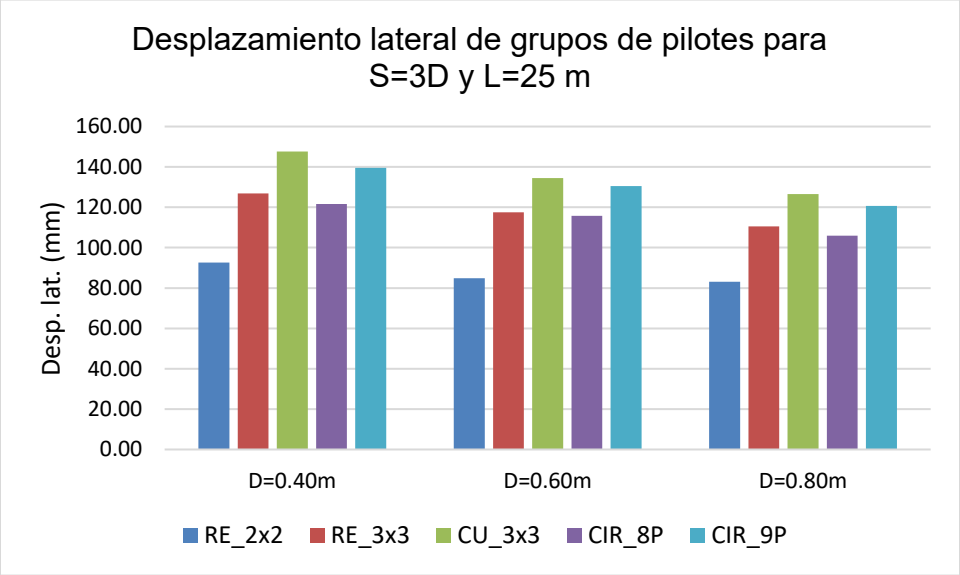


Gráfica 93. Asentamiento promedio (Uz/L) de CIR_8P_D80 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia

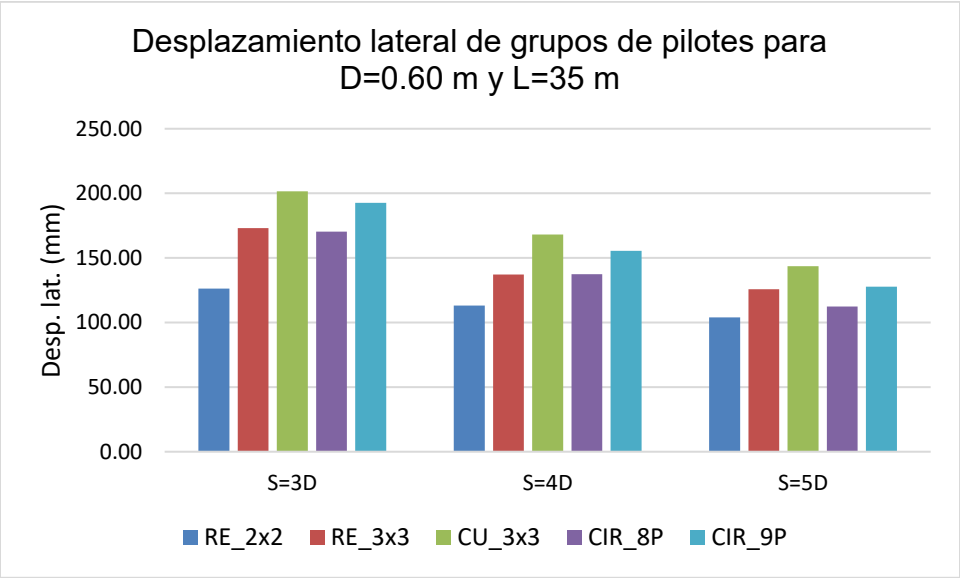
5.4.3 Desplazamientos laterales promedio de grupos de pilotes

Configuración de grupos

Las Gráfica 94 y Gráfica 95 muestran la comparación de desplazamiento lateral promedio de los grupos con pilotes sometidos a la carga lateral equivalente a 40 % de su capacidad de carga última.

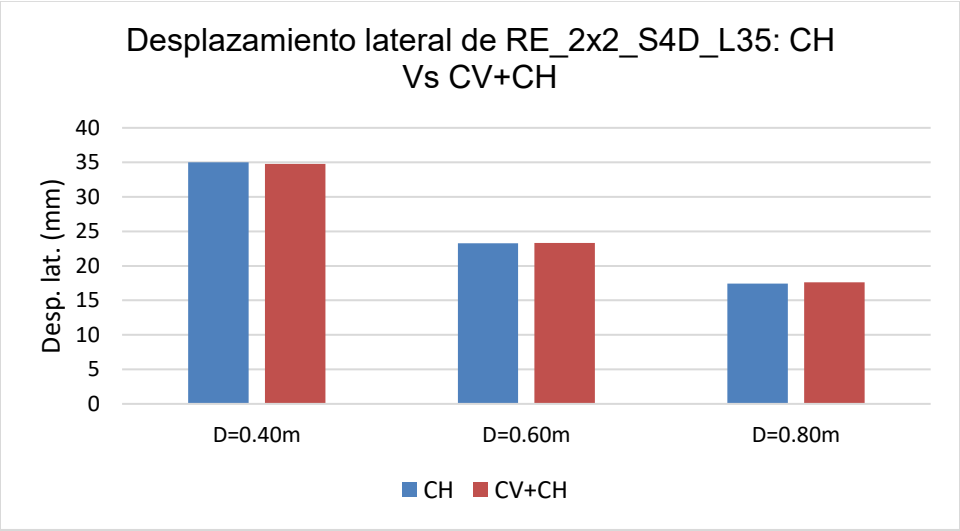


Gráfica 94. Desp. lat. para diferentes configuraciones de grupos con S=3D y L=25 m
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 95. Desp. lat. para diferentes configuraciones de grupos con D=0.60 m y L=35 m
Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados de desplazamiento lateral promedio de los grupos de pilotes RE_2x2 sometidos a cargas laterales de 200 y 800 KN estando soportando cargas gravitacionales (CV+CH) y cuando no lo están (CH), se pudo determinar que no hay una diferencia significativa para los diferentes estados cargas aplicados como se puede observar en la Gráfica 96.

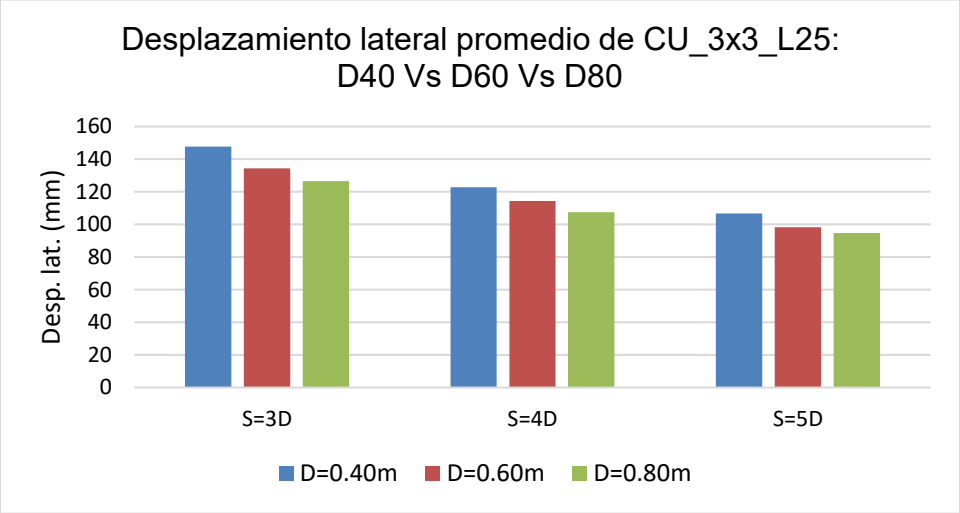


Gráfica 96. Desp. Lat. de RE_2x2_S4D_L45 para diferentes estados de cargas
Fuente: Elaboración propia

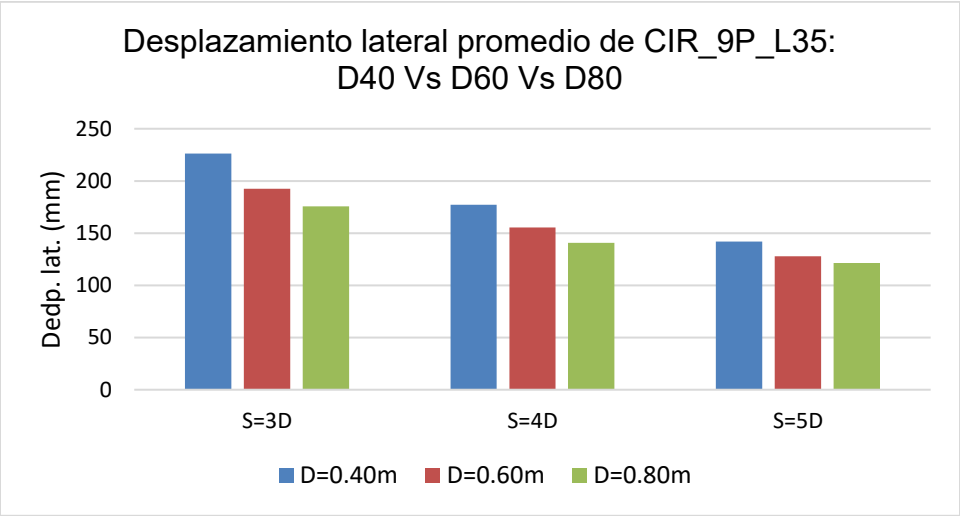
Diámetro D de pilotes

Las Gráfica 97 y Gráfica 98 muestran comparaciones de efecto del parámetro diámetro de los pilotes para los resultados de desplazamiento lateral promedio de los grupos con pilotes sometidos a 40 % de su capacidad de carga última como carga lateral.

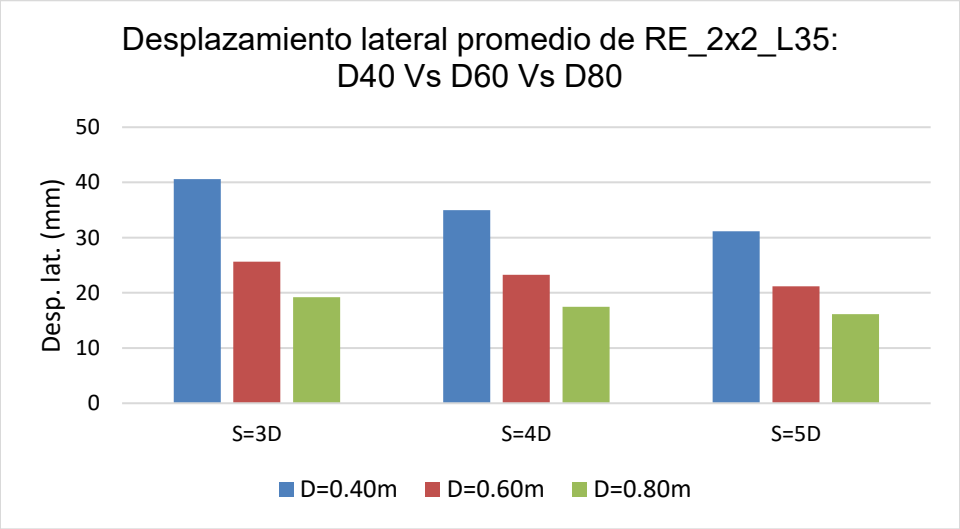
En los resultados de las comparaciones se pueden observar que se reduce el desplazamiento lateral promedio de los grupos al aplicar pilotes de mayor diámetro. Para los grupos con pilotes sometidos a la carga lateral equivalente a 40 % de su capacidad de carga última, los resultados de los análisis de métodos de elementos finitos muestran que, en los suelos lacustres de Bogotá, al aplicar pilotes de diámetro de 0.60 m en lugar de 0.40 m se puede reducir hasta 25 % el desplazamiento lateral promedio y en cuando se aplique diámetro de 0.80 m en lugar se puede disminuir el desplazamiento lateral promedio hasta a un 21%. Mientras que para los grupos RE_2x2 sometidos a la carga lateral de 200 KN y 800 KN, los resultados demuestran que se disminuye el desplazamiento lateral promedio de los grupos de 31 a 37 % al usar diámetro de 0.60 m en lugar de 0.40 m y se disminuye de 23 a 27 % al aplicar diámetro de 0.80m en lugar de 0.60 m.



Gráfica 97. Desp. Lat. promedio de CU_3x3_L25 para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia



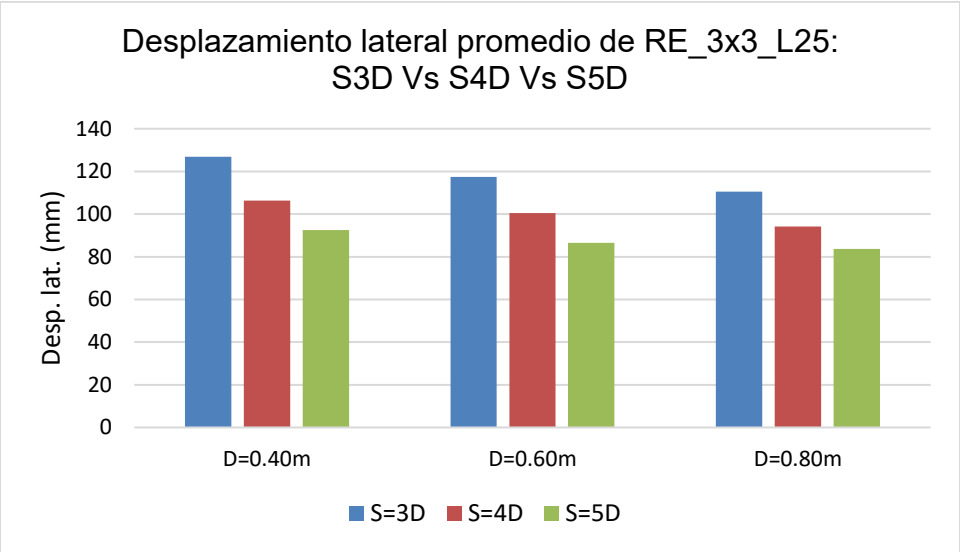
Gráfica 98. Desp. Lat. promedio de CIR_9P_L35 para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia



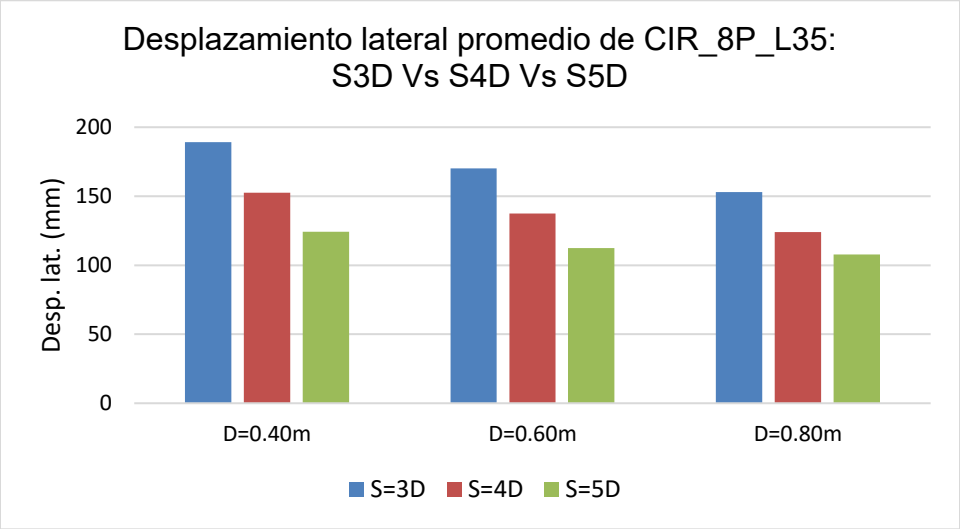
Gráfica 99. Desp. Lat. promedio de RE_2x2_L35 para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia

Separación S entre pilotes

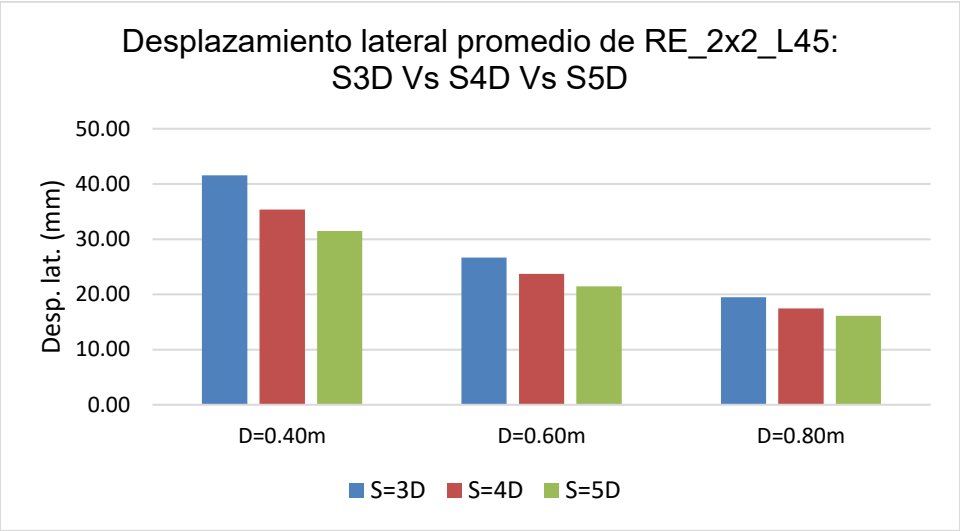
Las Gráfica 100 y Gráfica 101 presentan comparaciones de desplazamiento lateral promedio de grupos con pilotes sometidos a la carga lateral equivalente a 40 % de su capacidad de carga última y la Gráfica 102 presenta la misma comparación para grupos de pilotes sometidos a la carga lateral de 800 KN.



Gráfica 100. Desp. Lat. promedio de RE_3x3_L25 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 101. Desp. Lat. promedio de CIR_8P_L35 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 102. Desp. Lat. promedio de RE_2x2_L45 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia

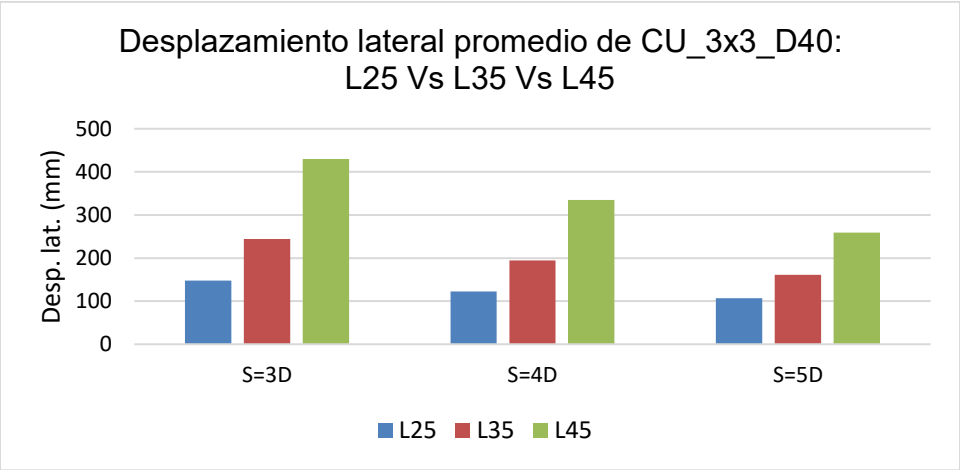
Los resultados de comparaciones muestran que con el incremento de la separación entre los pilotes se disminuye el desplazamiento lateral promedio de los grupos de pilotes. En general, los resultados de los análisis de métodos de elementos finitos de los grupos de pilotes estudiados en el perfil de suelos lacustres de Bogotá en Midas GTS NX muestran que para un incremento de separaciones entre los pilotes de 1D se reduce de 7 % hasta 26 % el desplazamiento lateral promedio de los grupos.

Longitud L de pilotes

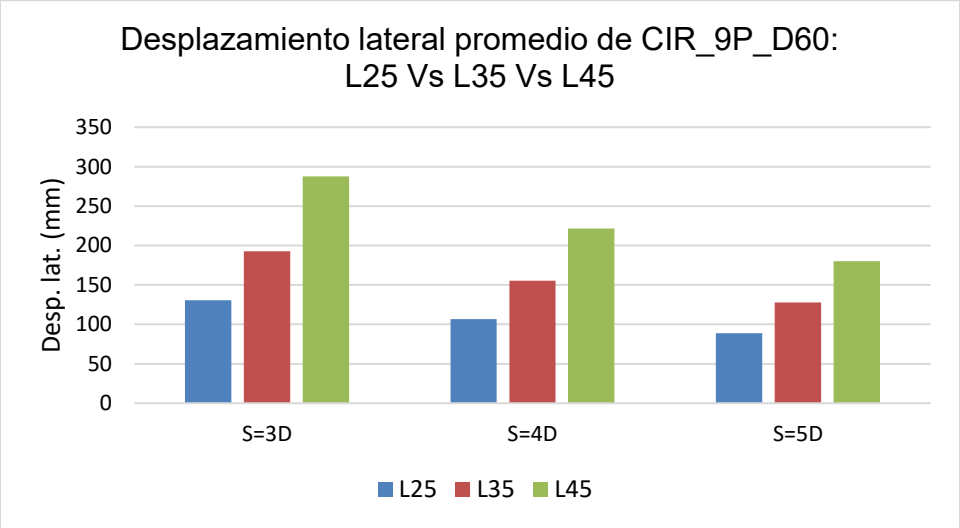
Las Gráfica 103 y Gráfica 104 presentan comparaciones de longitud de pilotes para el desplazamiento lateral promedio de grupos con pilotes sometidos a carga lateral equivalente a 40 % de su capacidad de carga última mientras que la Gráfica 105 presenta la comparación para el desplazamiento lateral promedio de grupos pilotes sometidos a la carga lateral de 800 KN.

En las Gráfica 103 y Gráfica 104 se puede observar que los grupos con pilotes de longitud de 45 m son los que tienen mayor desplazamiento lateral y luego los que tienen pilotes de longitud de 35 m y eso demuestra que al aumentar la longitud de los pilotes (también aumenta la carga lateral aplicada a los pilotes debido a que aumenta la capacidad carga última con mayor longitud) incrementa el desplazamiento lateral promedio de los grupos. Al observar el resultado de comparación de la Gráfica 105, se ve que para las diferentes longitudes de pilotes aplicados no hay una diferencia significativa entre los desplazamientos laterales de los grupos de pilotes.

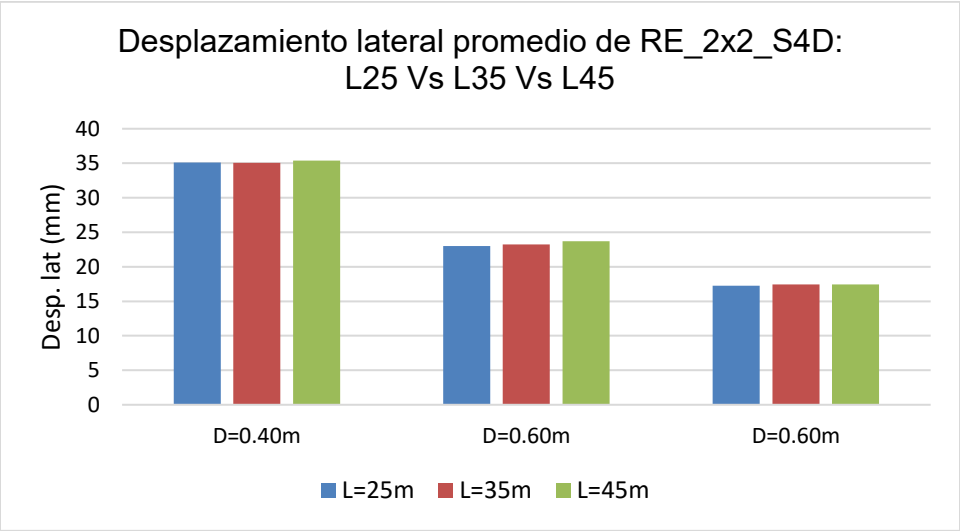
Los resultados del análisis de métodos de elementos finitos de los grupos de pilotes demuestran que una vez que los pilotes tengan la longitud efectiva para generar el empotramiento adecuado en el suelo para una carga lateral, el incremento de la longitud de ellos no aumenta su rigidez lateral por lo cual no reduce el desplazamiento lateral para la misma carga como se puede observar en la Gráfica 105.



Gráfica 103. Desp. Lat. promedio de CU_3x3_D40 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 104. Desp. Lat. promedio de CIR_9P_D60 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia

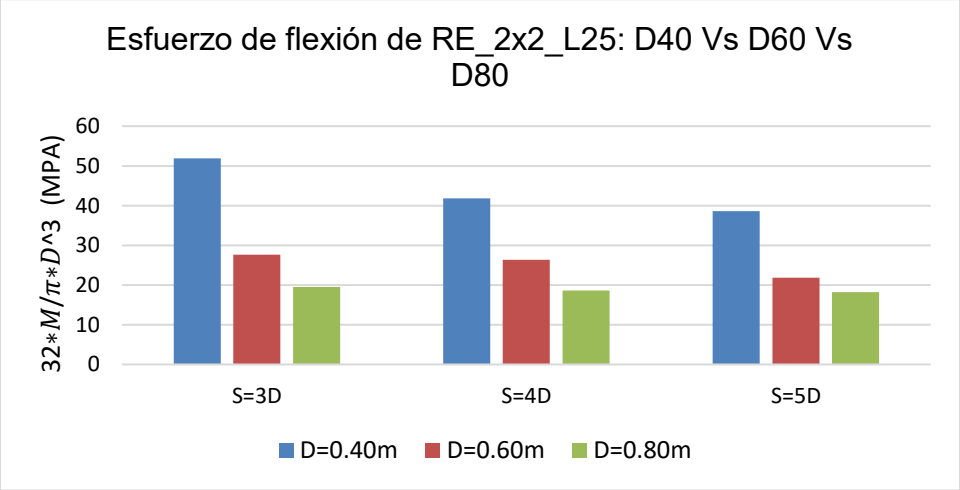


Gráfica 105. Desp. Lat. promedio de RE_2x2_S4D para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia

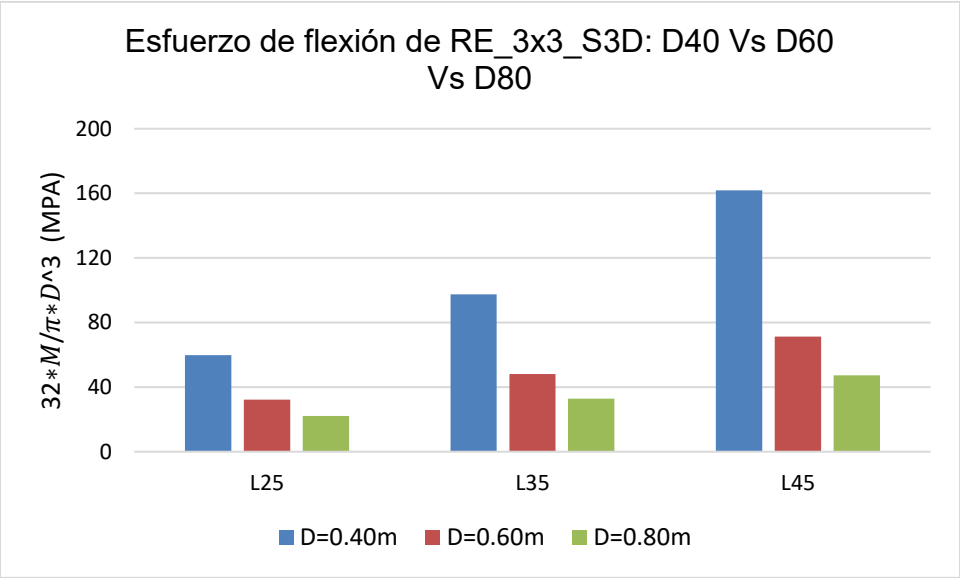
5.4.4 Momentos flectores

Diámetro D de pilotes

Al analizar los esfuerzos de flexión en los pilotes para los diámetros de pilotes analizados para todos los grupos de pilotes donde los pilotes fueron sometidos a carga lateral equivalente a 40 % de su capacidad de carga última, se evidencia que los valores de esfuerzos son menores para las combinaciones de grupos con pilotes de diámetros de 0.80 m. Los resultados de comparaciones muestran que al aumentar el diámetro de los pilotes se reducen los esfuerzos de flexión en ellos como se puede observar en las Gráfica 106 y Gráfica 107, donde se presentan resultados de esfuerzos máximos de flexión en los pilotes para grupos RE_2x2 y RE_3x3 respectivamente.



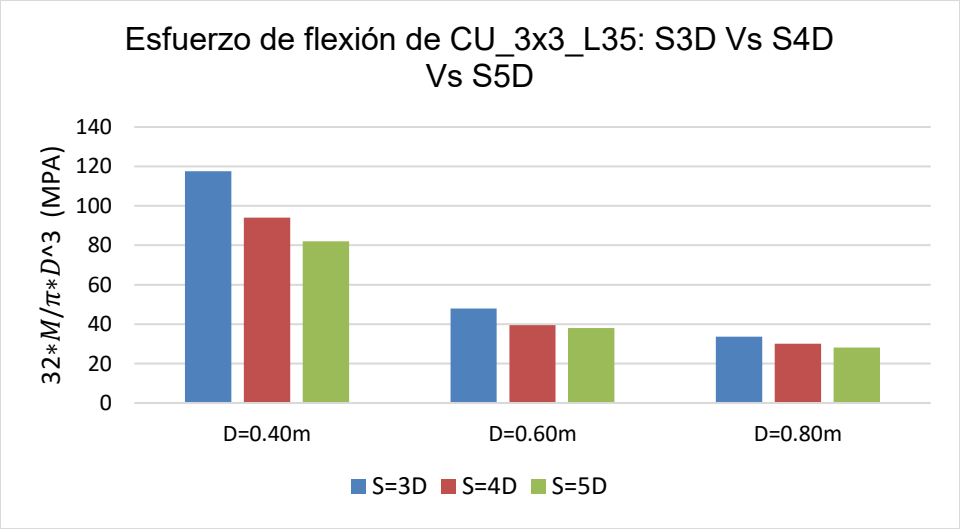
Gráfica 106. Esfuerzo de flexión de RE_2x2_L25 para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia



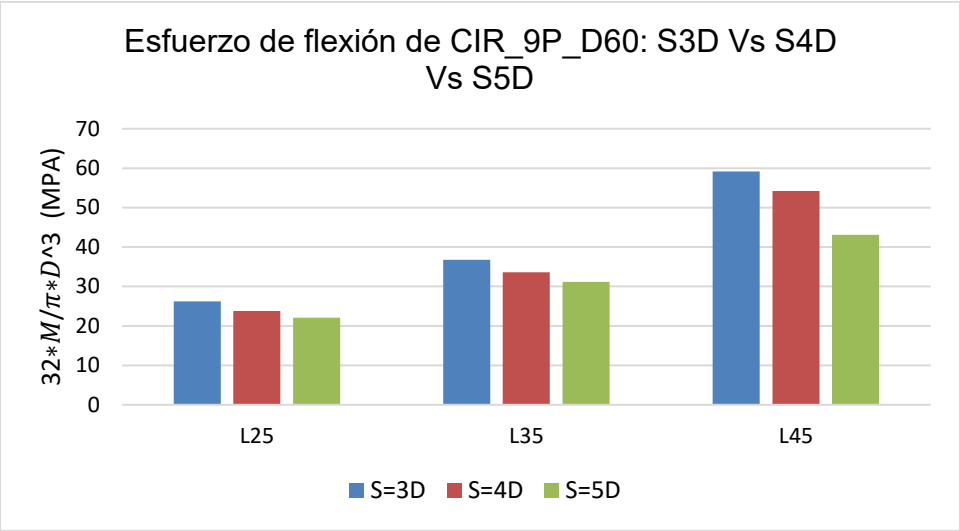
Gráfica 107. Esfuerzo de flexión de RE_3x3_S3D para diámetros de pilotes
Fuente: Elaboración propia

Separación S entre pilotes

Las Gráfica 108 y Gráfica 109 presentan esfuerzos máximos de flexión en los pilotes de los grupos CU_3x3 y CIR_9P, en ellas se puede observar el efeto del parámetro de espaciamiento entre los pilotes.



Gráfica 108. Esfuerzo de flexión de CU_3x3_L35 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia

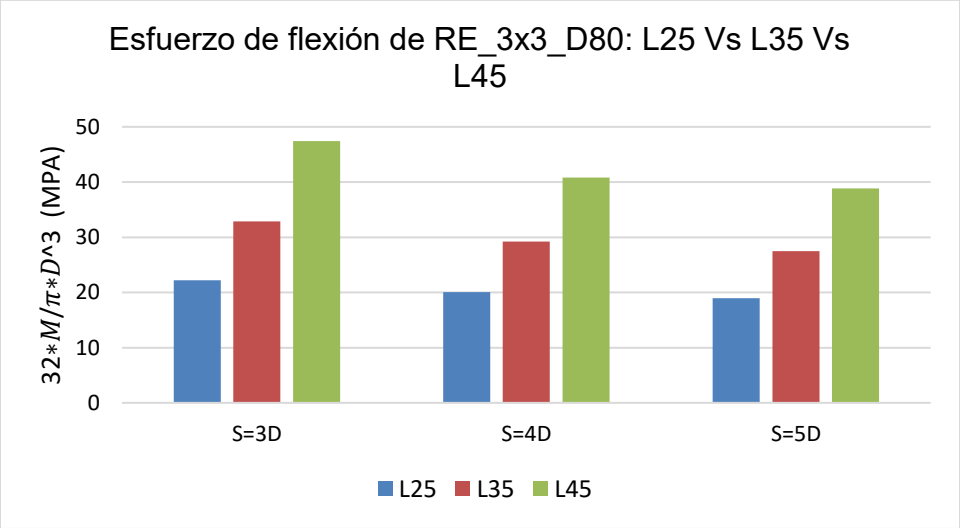


Gráfica 109. Esfuerzo de flexión de CIR_9P_D60 para separaciones de pilotes
Fuente: Elaboración propia

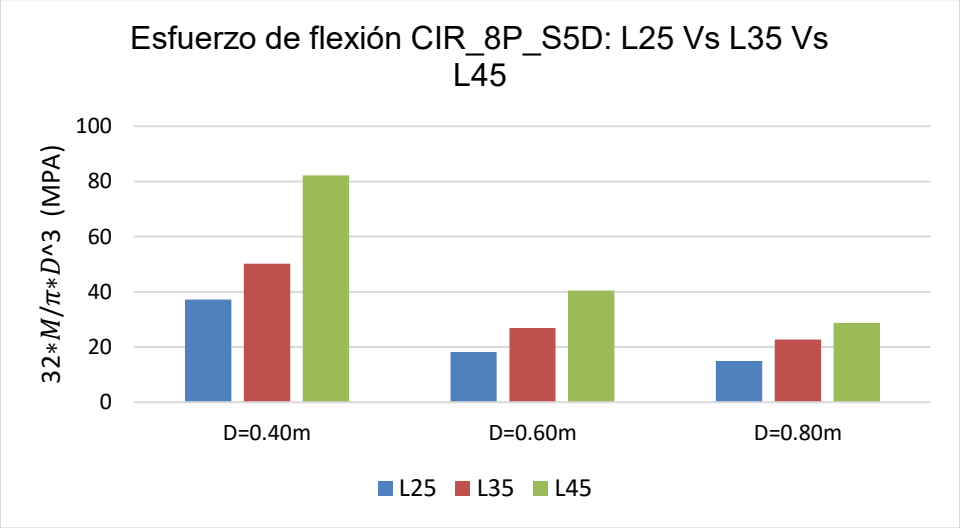
De manera general, los resultados de los análisis de métodos de elementos finitos realizados muestran que los esfuerzos internos de los pilotes, generados por los momentos flectores debido a las cargas laterales aplicadas, se reducen al aplicar mayores separaciones entre los pilotes como se puede apreciar en las Gráfica 108 y Gráfica 109.

Longitud L de pilotes

Al igual que los resultados de desplazamiento lateral de los grupos de pilotes bajo cargas laterales igual a 40 % de la carga última de los pilotes trabajando individualmente, al alargar los pilotes se incrementa su capacidad de carga vertical y de manera proporcional se aumenta la carga lateral. Por el efecto de incrementar las cargas laterales aplicadas a los grupos para pilotes de mayor longitud, se aumenta la magnitud los momentos flectores y de esta condición, se genera mayor esfuerzo en las secciones de los pilotes como se puede observar en las Gráfica 110 y Gráfica 111.



Gráfica 110. Esfuerzo de flexión de RE_3x3_D80 para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 111. Esfuerzo de flexión de CIR_8P_S5D para longitudes de pilotes
Fuente: Elaboración propia

5.4.5 Análisis estadístico de los datos de módulo de reacción de los suelos

A partir de los datos de módulo de reacción de los suelos obtenidos de los resultados del análisis de grupos de pilotes RE_2x2 sometidos a cargas laterales modelados en el perfil geotécnico promedio de los suelos arcillosos lacustres de Bogotá por medio del método de elementos finitos (Ver sección 5.2.7 y 5.2.8), se realizó un análisis estadístico para una profundidad de 45 m dividida en 9 capas de 5 m.

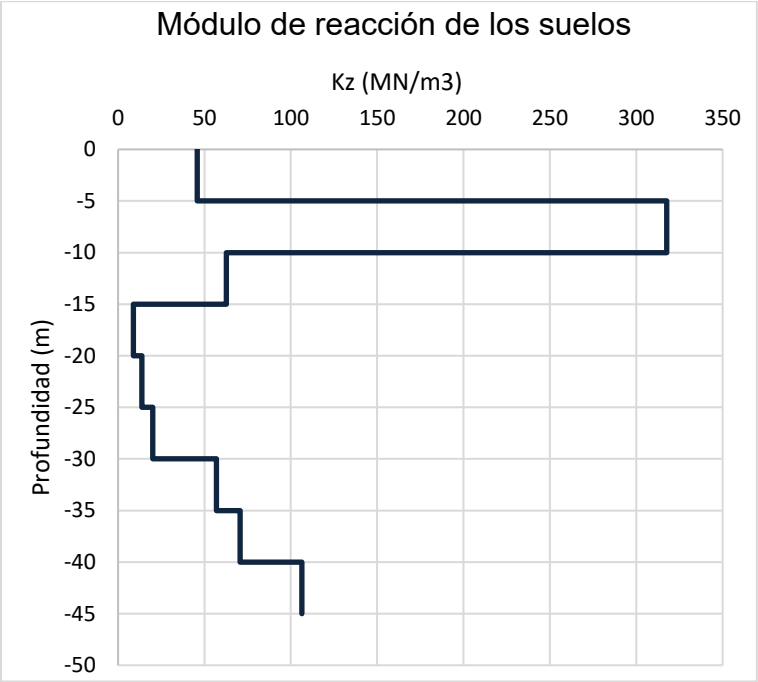
En la Tabla 73 se presentan la media, el máximo, el mínimo y la desviación estándar de los datos del módulo de reacción de los suelos para las diferentes profundidades. La Gráfica 112 presenta la variación de media de los datos de módulo de reacción de los suelos con profundidad.

Se evidencia que, en la Gráfica 112, en los primeros 10 metros de profundidad se presenta el mayor valor del módulo de reacción de los suelos del perfil geotécnico de este trabajo, luego, se disminuye de manera muy significativa y después se incrementa con profundidad a partir de los 15 metros.

Tabla 73. Datos estadísticos de módulo de reacción de los suelos

Profundidad	Media (MN/m^3)	Max (MN/m^3)	Min (MN/m^3)	Des. Est. (MN/m^3)
0-5m	45.81	7059.53	0.08	329.57
5-10m	317.63	34533.38	10.95	1748.63
10-15m	62.74	2153.94	0.01	140.49
15-20m	8.86	62.03	0.01	8.41
20-25m	13.84	407.03	0.02	30.85
25-30m	19.97	1322.55	0.02	73.66
30-35m	56.88	3695.99	0.00	229.21
35-40m	70.66	8400.30	0.01	433.25
40-45m	106.44	8400.30	0.04	637.23

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 112. Variación de módulo de reacción de los suelos con profundidad
Fuente: Elaboración propia

5.5 SINTESIS

En este capítulo, se presentaron los resultados del análisis de los grupos de pilotes sometidos a cargas gravitacionales modelados en el perfil geotécnico representativo de los suelos arcillosos del depósito lacustre de Bogotá por medio del método de elementos finitos. En la primera parte, se presentaron la eficiencia de los grupos de pilotes, desplazamientos verticales y laterales, momentos flectores en los pilotes y módulo de reacción del suelo.

En el análisis de los resultados, se evidenció que la eficiencia de los grupos de pilotes se aumenta con mayor separación entre pilotes y con pilotes de mayor longitud, se disminuye al incrementar el número de pilotes en los grupos mientras que el parámetro diámetro no presenta un efecto significativo en estos resultados. Con respecto al desplazamiento vertical promedio de los grupos de pilotes, los resultados mostraron que se genera mayor asentamiento en los pilotes de los grupos que contienen mayor número de pilotes mientras que, se reduce el asentamiento al usar mayor espaciamiento entre pilotes, también se disminuye el asentamiento normalizado con el diámetro y con la longitud de pilotes al aumentar el diámetro y la longitud de los pilotes respetivamente.

Para los grupos de pilotes sometidos a cargas laterales, los resultados mostraron que se genera más desplazamiento lateral en los grupos que contienen mayor número de pilotes. Cuando se usa pilote de mayor diámetro o se agranda el espaciamiento entre los pilotes se disminuye de manera significativa el desplazamiento lateral promedio de los grupos, también se genera menos esfuerzos de flexión en los pilotes. En el caso de la longitud de los pilotes, cuando las cargas laterales están en función de la capacidad de carga última de los pilotes, se aumenta el desplazamiento lateral promedio del sistema y los esfuerzos internos de los pilotes al aumentar la longitud de pilotes, pero, cuando las cargas laterales son constantes, el incremento de longitud de los pilotes no genera ningún cambio significativo para estos resultados.

6. CONCLUSIONES

La respuesta mecánica de los grupos de pilotes analizados en el perfil geotécnico promedio de los suelos lacustres de Bogotá, por medio del método de elementos finitos 3D en el programa Midas GTS NX, muestra la influencia de los diferentes parámetros estudiados en los resultados de eficiencia, de deformaciones y de los esfuerzos internos de los elementos de los grupos de pilotes de este trabajo.

La comparación de los resultados de eficiencia de los grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales para las diferentes configuraciones hace notar que los grupos que contienen más pilotes son los que tienen menos eficiencia y eso demuestra que con mayor número de pilotes en un conjunto, se reduce su eficiencia y genera un mayor asentamiento en ello. Al examinar la capacidad de carga última de cada pilote en un grupo, se observó que los pilotes centrales son los que tienen menos capacidad de soporte y luego los de borde debido a que estos pilotes comparten el suelo de sus alrededores con otros y al transmitir los esfuerzos al suelo se traslapan y por tanto se reduce su capacidad de soporte. El efecto del número de pilotes y la posición de ellos en un grupo bajo el efecto de cargas gravitacionales es similar en la repuesta mecánica de los grupos ante cargas laterales en los suelos de este estudio.

En los resultados se logró observar que, para los diferentes grupos de pilotes analizados, el diámetro de los pilotes es insignificante en la determinación de la eficiencia de los grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales. Al igual que los métodos empíricos para determinar la eficiencia de un grupo de pilotes, al cambiar el diámetro de los pilotes de un grupo no varía el valor de su eficiencia.

La respuesta mecánica de los grupos de pilotes ante las cargas laterales hace constar que el uso de mayor sección de pilotes aumenta la rigidez lateral del conjunto. El desplazamiento lateral promedio de los grupos de pilotes disminuye hasta 25 % al aplicar pilotes de mayor diámetro, aunque aumenta la magnitud de la carga lateral ya que está en función de la capacidad de carga última de los pilotes. Además, se presentan valores menores de esfuerzos internos en los pilotes lo que generará menos demanda de refuerzos para su diseño estructural.

De manera general, los resultados de los análisis por métodos de elementos finitos demuestran que el uso de mayor separación entre pilotes como el valor de 5 veces del diámetro mejora la respuesta mecánica de los grupos de pilotes. En el caso de eficiencia de los grupos de pilotes bajo las cargas gravitacionales se aumenta su magnitud con el uso de mayor separación entre los elementos, sobre todo, para los pilotes más cortos donde sus fustes se encuentran en capas de suelos menos resistentes del perfil geotécnico de las arcillas del depósito lacustre de Bogotá. los resultados muestran que el incremento de 1D en las separaciones entre pilotes genera incremento, en ciertos casos, hasta 13.35 % en la eficiencia de los grupos de pilotes.

Así mismo, el aumento del espaciamiento en los pilotes genera una reducción del asentamiento vertical del sistema bajo las cargas gravitacionales de 3 % hasta 12 % y

también reduce el desplazamiento lateral de 7 % hasta 26 % ya que ese cambio aumenta la rigidez lateral de los pilotes, además, influye en la reducción de esfuerzos internos de los pilotes generados por los momentos flectores en la respuesta mecánica de los grupos al ser sometidos a cargas laterales.

En los resultados de los análisis de los grupos de pilotes se pudo observar que se mejora la eficiencia de los grupos de pilotes en los suelos lacustre de Bogotá al usar pilotes de mayor longitud. Un incremento de 5 m a la longitud de los pilotes, genera un aumento hasta 12 % en la eficiencia de los grupos de pilotes. Al analizar el perfil geotécnico representativo de los suelos del depósito lacustre de Bogotá se determina que la resistencia de los suelos se mejora con mayor profundidad, por lo tanto, los pilotes más largos se encuentran en estratos de suelos más resistentes y así se aumenta la eficiencia de los grupos de pilotes.

La respuesta mecánica de los pilotes ante las cargas laterales demuestra que todos tienen un comportamiento elástico por sus longitudes. La comparación de los resultados de desplazamiento lateral en la cabeza de los pilotes sometidos a las cargas laterales constantes no muestra una diferencia significativa al aumentar la longitud de los pilotes. Eso concluye que una vez que los pilotes tengan la longitud mínima de empotramiento en los suelos, el incremento de su longitud no mejora la rigidez lateral de ellos o del grupo.

7. RECOMENDACIONES

Para un mejor análisis y diseño geotécnico, se recomienda usar programas geotécnicos de métodos de elementos finitos en 3 dimensiones ya que permiten obtener resultados más exactos y precisos de la respuesta mecánica de los sistemas de cimentaciones a base de pilotes ante cargas gravitacionales y laterales.

Se recomienda usar pilotes de mayor sección para cimentaciones en los suelos arcillosos del depósito lacustre de Bogotá para estructuras que, en su vida útil, puedan ser sometidas a grandes cargas laterales. Los sistemas de pilotes con mayor sección son más estables ante las cargas laterales y los esfuerzos internos son mucho más pequeños y eso permitirá realizar diseños estructurales más económicos de los pilotes.

El uso de mayor distancia entre los pilotes de un grupo mejora de manera significante la repuesta mecánica del conjunto en los suelos blandos como las arcillas de la sabana de Bogotá. Se recomienda usar espaciamiento 5 veces de los diámetros entre los pilotes ya que con esta distancia se aumenta la eficiencia de los grupos de pilotes bajo cargas gravitacionales, se disminuyen las deformaciones del sistema y los momentos de flector en los pilotes por tanto se generará sistemas de cimentaciones más estables, económicos y proyectos de construcción más sostenibles.

Para futuros trabajos de investigación se recomienda estudiar la respuesta mecánica, sobre todo la eficiencia, de sistema de grupo de pilotes conectado con placa o cabezal en contacto con los suelos en un perfil geotécnico representativo de los suelos lacustres de Bogotá para analizar la influencia del cabezal ya que generará una mayor rigidez al sistema y será un gran aporte para construcciones que requieren sistema placa pilotes como cimentación. También, se recomienda estudiar la respuesta mecánica de grupos de pilotes modelados en diferentes perfiles de suelos arcillosos por medio del método de elementos finitos para evaluar el efecto de los perfiles geotécnicos en los resultados de eficiencia de los grupos de pilotes.

8. REFERENCIAS

Abdel-Azim, O. A., Abdel-Rahman, K., & El-Mossallamy, Y. M. (2020). Numerical investigation of optimized piled raft foundation for high-rise building in Germany. *Innovative Infrastructure Solutions*, *5*(1), 1–11. https://doi.org/10.1007/s41062-019-0258-4

Al-abboodi, I., & Sabbagh, T. T. (2019). Numerical Modelling of Passively Loaded Pile Groups. *Geotechnical and Geological Engineering*, *37*(4), 2747–2761. https://doi.org/10.1007/s10706-018-00791-z

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Título C Concreto Estructural. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente: NSR 10*, 1–21. http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_C.pdf

Ata, A., Badrawi, E., & Nabil, M. (2015). Numerical analysis of unconnected piled raft with cushion. *Ain Shams Engineering Journal*, *6*(2), 421–428. https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.002

Braja M, D. (1999). Refuerzo del Suelo. In International Thomson (Ed.), *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (Cuarta).

BRAJA M, D. (2011). *Fundamentos de ingenieria de cimentaciones - Braja Das - 7ma Edición* (7th ed.). https://www.yumpu.com/es/document/view/55899516/fundamentos-de-ingenieria-de-cimentaciones-braja-das-7ma-edicion

Budhu, M., Yaman, H., Turan, S., Kara, A., Kara, F., Zhu, B., Qu, X., Tao, Y., Zhu, Z., Dhokia, V., Nassehi, A., Newman, S. T., Zheng, L., Neville, A., Gledhill, A., Johnston, D., Zhang, H., Xu, J. J., Wang, G., … Dutta, D. (2018). Soil mechanics and foundation engineering. Muni Budhu -3rd Edition. In *Journal of Materials Processing Technology* (Vol. 1, Issue 1). http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252%0Ahttp://dx.doi.o

Caicedo, B., Mendoza, C., López, F., & Lizcano, A. (2018). Behavior of diatomaceous soil in lacustrine deposits of Bogotá, Colombia. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *10*(2), 367–379. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.005

Das, B. M. (2001). *Ingeniería Geotécnica*.

Durán G., J. E. (2003). Optimización de un sistema de cimentacion placa – pilotes en el deposito lacustre de bogotá. *III Encuentro Nacional de Ingenieros De Suelos y Estructuras,2003.*, 65.

Elwakil, A. Z., & Azzam, W. R. (2016). Experimental and numerical study of piled raft system. *Alexandria Engineering Journal*, *55*(1), 547–560. https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.001

Engineering, P. (2017). Piling Engineering, Third Edition. In *Piling Engineering, Third Edition*. https://doi.org/10.4324/9780203937648

ESTADÍSTICAS DE EDIFICACIÓN LICENCIAS DE CONSTRUCCIÓN - DANE | Secretaría Distrital de Planeación. (n.d.). Retrieved April 8, 2022, from https://www.sdp.gov.co/gestion-estudios-estrategicos/informacion-cartografia-y-

estadistica/repositorio-estadistico/estadisticas-de-edificacion-licencias-de-construccion-dane%5D

Fonseca, Nacional, Gerente, Estructuracion, D., & Julio, F. D. N. (2015). *Estructuración integral de la Primera Línea del Metro de Bogotá*.

Lambe, T. W., & Whitman, V. R. (2004). *Mecanica de suelos, (Traducción J.A. Jiménez Salas y J.M. Rodríguez),*.

Lynx Simulatiotions. (n.d.). *Lynx Simulations. Simulacion numérica - CFD*. Retrieved October 16, 2020, from https://lynxsimulations.com/es/#cbp=../contenido/es/text_simuNumerica.html

Mali, S., & Singh, B. (2019). 3D Numerical Modeling of Large Piled-Raft Foundation on Clayey Soils for Different Loadings and Pile-Raft Configurations. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *42*(1). https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0026

Meli, R. (2000). *Diseño estructural*.

Merritt, F. S. . L. M. K. R. J. T. (2008). *Manual del ingeniero civil* (Cuarta edi). McGraw-Hill.

Minas; Energia. (n.d.). *Área de Simulación numérica de procesos industriales y de fenómenos naturales*. Retrieved October 16, 2020, from http://www.minasyenergia.upm.es/0-6-centros-de-formación-e-investigación/actividades-formativas/área-de-simulación-numérica-de-procesos-industriales-y-de-fenómenos-naturales.html

Monzón, J. S., & Varela, A. (2018). Evaluación de asentamientos en el tiempo de sistemas placa-pilote apoyados sobre depósitos arcillosos de Bogotá D.C. utilizando un modelo 3D de elementos finitos. *Obras y Proyectos*, *23*, 6–24. https://doi.org/10.4067/s0718-28132018000100006

Nasrollahi, S. M., & Seyedi Hosseininia, E. (2019). A simplified solution for piled-raft foundation analysis by using the two-phase approach. *Comptes Rendus - Mecanique*, *347*(10), 716–733. https://doi.org/10.1016/j.crme.2019.10.002

Parra-Gómez, L. J. (2019). *Spatial geotechnical modeling of a lacustrine deposit using functional geostatistical analysis of CPTu tests*.

Pineda-jaimes, J. A., & Colmenares, J. (2015). Variations of the coefficient of lateral earth pressure at rest (Ko) in surface clays of western Sabana de Bogota Variaciones del coeficiente lateral en reposo K o en arcillas superficiales del occidente de la sabana de Bogotá. *Epsilon*, *25*(December), 177–201.

Pineda-Jaimes, J. A., García-Ubaque, C. A., & Esquivel-Ramírez, R. E. (2020). Assessment of Geotechnical Hazard due to Deep Excavations in Bogota Clays: A Contribution for Sustainability in Urban Environments. *Revista Facultad de Ingeniería*, *29*(54), e11373. https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11373

Primera, D. E. L. A., Del, L., & Abiotica, L. B. (2018). *Sfg4128 v6*.

Puerto, G., Losada, L., Díaz, F. J., & Rodríguez, G. A. (2010). *SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES INFORME FINAL VOLUMEN 1 ORIGINAL COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO OCTUBRE DE 2010 Subdirección de Técnica y de Gestión*.

Rodríguez, E. E., Sánchez, M. A., & Garzón, J. C. (2016). Geotechnical characterization of soft clay in Bogota through use advanced field test and laboratory test. *2nd International Specialized Conference on Soft Rocks - an ISRM Specialised Conference, ICSR 2016*.

Rodríguez, J. A., & Velandia, E. (2009). Optimización de Cimentaciones en suelos blandos de Bogotá. *Eci*.

Rodríguez Rebolledo, J. F., & Auvinet Guichard, G. (2019). Analytical model for friction piles in consolidating soft soils. *Ingeniare*, *27*(2), 295–303. https://doi.org/10.4067/S0718-

33052019000200295

Rose, A. V., Taylor, R. N., & El Naggar, M. H. (2013). Numerical modelling of perimeter pile groups in clay. *Canadian Geotechnical Journal*, *50*(3), 250–258. https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0194

Ruge Cárdenas, J., Pinto da Cunha, R., & Rondón Quintana, H. (2014). Simulation of Load Tests in Piles Using a Hypoplastic Constitutive Model. *Revista EIA*, *1*(21), 171–183.

Susila, E., & Anggraini, N. (2016). Soil-structure interaction of a piled raft foundation in clay – a 3D numerical study. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, *48*(4), 388–407. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2016.48.4.2

SYSTRA, & INGETEC. (2018). *Estructuración técnica del tramo 1 de la Primera línea del metro de Bogotá (PLMB) - Informe de diseño geotécnico de cimentaciones del proyecto.* 398.

Vargas Díaz, M. P. (2020). *Grupo de pilotes: Estado del arte*. 1–16.

Yudiawati, Y., Mochtar, I. B., & Mochtar, N. E. (2019). Group capacity and efficiency of full friction piles on very soft soil. *International Journal of GEOMATE*, *16*(57), 201–208. https://doi.org/10.21660/2019.57.68950