



**ANÁLISIS Y CORRELACIÓN ENTRE PRUEBAS DE CARGA SOBRE
MICROPILOTES Y TRES METODOLOGÍAS USADAS PARA CALCULAR
CAPACIDAD DE CARGA AXIAL A COMPRESIÓN.**

POR:

CARLOS MARIO ROJAS SOLANO

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE MAGISTER

EN INGENIERÍA - GEOTECNIA

Director

OSCAR ECHEVERRI RAMIREZ

FACULTAD DE MINAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA - GEOTECNIA

MEDELLÍN, AGOSTO DE 2017

FICHA BIBLIOGRÁFICA

ROJAS SOLANO, CARLOS MARIO (2017)

Análisis y correlación entre pruebas de carga sobre micropilotes y tres metodologías usadas para calcular capacidad de carga axial a compresión.

121 Páginas, 210 x 297 mm (Magíster en Ingeniería - Geotecnia 2017)

Tesis de Maestría. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín

Maestría en Ingeniería – Geotecnia

Cimentaciones especiales

Micropilotes

Pruebas de carga

DEDICATORIA:

Dedico este proyecto logrado a todas las personas que labraron la capacidad de trabajo como mi mejor virtud. También con gran orgullo a GEODIC, todos mis compañeros y colaboradores.

AGRADECIMIENTOS:

El autor expresa su más sincero agradecimiento a:

A mi madre, por la más grande razón, darme la vida y por el respaldo incondicional.

A mi papá, por ayudarme a dar calma.

A mi hermana, por traerme a la ingeniería civil y por la alegría de la pequeña Lucía.

A mi familia, porque me han apoyado, impulsado, levantado, colaborado, estremecido y gratificado.

A mi hermano Jose, que ha sido hijo, compañero, amigo y socio.

Al ingeniero, Daniel Martínez, socio y amigo por el apoyo. Hay que hacerlo, moral.

Al Ingeniero MSc, Oscar Echeverry Ramírez por su entusiasmo en el tema presentado.

Al Ing Esp, MSc, Leonardo Herrera Baquero por las ideas y correcciones. Es posible desarrollar nuevas técnicas y mejorar las antiguas prácticas locales.

A todos los participantes de la actividad que mueve mi vida, la ingeniería Civil, desde el ayudante con preguntas inexpertas hasta los gerentes con observaciones acertadas. Todos me han enseñado un poco de lo que hago

RESUMEN

Este documento presenta una recopilación de información acerca del diseño y construcción de micropilotes en el ámbito local, así como un marco teórico de pruebas de carga axial a compresión sobre elementos individuales y establece comparaciones entre los resultados de una muestra definida de prueba de carga de verificación versus tres (3) metodologías de cálculo de capacidad de carga teórica: Federal Highway Administration Publication FHWA NHI-05-039, Micropile Design and Construction de diciembre de 2005, Guía Española para proyectos y la ejecución de micropilotes en obras de carretera de 2005, y el Método para cálculo de tirantes y micropilotes inyectados de Bustamante y Doix de 1985.

Palabras claves: Micropilote, perforación, inyección, pre-barrenado, autoperforante, prueba, carga, deformación, método.

ABSTRACT

This document presents a compilation of information about micropiles design and locally construction, as well as a framework of axial compression testing load onto individual elements and sets a comparison between the results of several verification tests vs three (3) bearing capacity methods computation as: Federal Highway Administration Publication FHWA NHI-05-039, Micropile Design and Construction december 2005, Spanish Guideline for projects and the execution of micropiles in road works of 2005, and Method of calculating grouted tie rods and micropiles by Bustamante and Doix1985.

Keywords: Micropile, drilling, grouting, pre-boring, hollow bar / self-drilling, test, load, deformation/settlement, method.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS.....	XIV
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 OBJETIVOS	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 METODOLOGÍA	3
1.6 CONTENIDO.....	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	7
2.1. ESTADO DEL ARTE	11
2.2. MICROPILOTES.....	15
2.2.1. Fundamentos teóricos de micropilotes.....	19
2.2.2. Micropilotes Pre-Barrenados	20
2.2.3. Micropilotes Auto-perforantes.....	23
2.3. PRUEBAS DE CARGA.....	25
2.3.1. Tipos de prueba	28
2.3.1.1. Ensayo de verificación	30
2.3.1.2. Ensayo de prueba.....	31
2.3.1.3. Características de la prueba de carga	31
2.3.1.3.1. Equipos y herramientas	31
2.3.1.3.2. Características de los micropilotes	31
2.3.1.3.3. Montaje prueba de carga.....	33
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS	35
3.1. MÉTODO DE BUSTAMANTE & DOIX.....	35
3.1.1. Recomendaciones.....	37
3.1.2. Generalidades de dimensionamiento	37
3.1.3. Cálculo de capacidad a compresión de un micropilote	38

3.1.4. Factores de seguridad	44
3.2. GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA (GUÍA ESPAÑOLA)	45
3.2.1. Comprobación frente a hundimiento	45
3.2.1.1. Comprobación frente al hundimiento en suelos	45
3.2.1.2. Comprobación frente al hundimiento en roca	47
3.2.2. Resistencia teórica por fuste	47
3.2.2.1. Situaciones de corto plazo	48
3.2.2.2. Correlaciones empíricas	49
3.2.3. Resistencia por punta	51
3.2.3.1. Resistencia por punta en suelos	51
3.2.4. Resistencia por empotramiento en roca	51
3.2.5. Cálculo de asentamientos	52
3.2.5.1. Roca	52
3.2.5.2. Suelos granulares	54
3.2.5.3. Suelos cohesivos	55
3.2.6. Grupos de micropilotes	55
3.2.6.1. Carga vertical	55
3.2.6.2. Asentamiento de un grupo micropilotes	56
3.3. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA)	57
3.3.1. Diseño preliminar	57
3.3.1.1. Espaciamiento	58
3.3.1.2. Longitud	58
3.3.1.3. Sección	59
3.3.1.4. Tipo	59
3.3.2. Diseño estructural longitud de tubería	59
3.3.3. Diseño estructural de la longitud sin tubería	60
3.3.4. Revisión de diseño	60
3.3.5. Evaluación de capacidad geotécnica del micropilote	60
3.3.5.1. Establecer un estrato para la zona de bulbo	60
3.3.5.2. Seleccionar el esfuerzo último del bulbo y su longitud	60
3.3.5.3. Evaluación a compresión del grupo	64
3.3.6. Estimación de asentamientos	66
3.3.6.1. Asentamiento de grupos	66

3.3.6.2. Acortamiento elástico.....	68
CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE CARGA. ENSAYOS EXPERIMENTALES	70
CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS FRENTE A RESULTADOS DE PRUEBAS DE CARGA.....	88
CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	104
6.1. IDENTIFICAR LOS REQUERIMIENTOS Y LA FACTIBILIDAD DE USAR MICROPILOTES 105	
6.2. REVISAR LA INFORMACIÓN DISPONIBLE Y EJECUTAR LA EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO.....	106
6.3. DETERMINAR LAS CARGAS MUERTA, VIVA NORMAL Y VIVA MÁXIMA.....	106
6.4. DETERMINAR PERFIL GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO.....	106
6.5. REALIZAR UN DISEÑO PRELIMINAR.....	107
6.5.1. Separación.....	107
6.5.2. Longitud.....	107
6.5.3. Sección.....	107
6.5.4. Tipo de inyección.....	107
6.6. EVALUAR LA CAPACIDAD GEOTÉCNICA DEL MICROPILOTE	108
6.7. APLICAR LA METODOLOGÍA PRESENTE DE <i>FCD</i> PARA ENCONTRAR <i>PCL</i>	108
6.8. ESTIMAR EL ASENTAMIENTO DEL GRUPO DEL GRUPO DE MICROPILOTES..	108
6.9. ANALIZAR SI EL DISEÑO PRELIMINAR CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS	108
6.10. REALIZAR RECOMENDACIONES DE PRUEBAS DE CARGA	109
6.11. PREPARAR ESQUEMAS Y ESPECIFICACIONES	109
CAPÍTULO 7. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PROPUESTA.....	110
7.1. IDENTIFICAR LOS REQUERIMIENTOS Y LA FACTIBILIDAD DE USAR MICROPILOTES 110	
7.2. REVISAR LA INFORMACIÓN DISPONIBLE Y EJECUTAR LA EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO.....	110
7.3. DETERMINAR LAS CARGAS MUERTA, VIVA NORMAL Y VIVA MÁXIMA.....	111
7.4. DETERMINAR PERFIL GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO.....	112
7.5. REALIZAR UN DISEÑO PRELIMINAR.....	114
7.6. EVALUAR LA CAPACIDAD GEOTÉCNICA DEL MICROPILOTE	114
7.7. APLICAR LA METODOLOGÍA PRESENTE DE <i>FCD</i> PARA ENCONTRAR <i>PU CL</i>	115
7.8. ESTIMAR EL ASENTAMIENTO DEL GRUPO DEL GRUPO DE MICROPILOTES..	115
7.9. ANALIZAR SI EL DISEÑO PRELIMINAR CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS	116

7.10. REALIZAR RECOMENDACIONES DE PRUEBAS DE CARGA	116
7.10.1. Resultado prueba de carga.....	116
7.11. PREPARAR ESQUEMAS Y ESPECIFICACIONES	117
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	118
8.1. CONCLUSIONES.....	118
8.2. LIMITACIONES.....	120
8.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	120
ANEXO 1. RESUMEN DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE PROYECTOS.....	122
PROYECTO 3088	122
PROYECTO 3089	123
PROYECTO 3091	124
PROYECTO 3106	124
PROYECTO 3110	124
PROYECTO 3113	125
PROYECTO 3114	125
PROYECTO 3135	127
PROYECTO 3136	127
PROYECTO 3144	128
PROYECTO ADC1.....	130
PROYECTO ADC2.....	130
ANEXO 2. MEMORIAS DE METODOLOGÍAS APLICADAS A CADA PROYECTO.	131
MÉTODO DE BUSTAMANTE & DOIX.....	132
GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA (GUÍA ESPAÑOLA)	138
FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA).....	147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva Esfuerzo vs Deformación - Prueba de micropilotes en Napoles. (Lizzi, 1980)... 8	8
Figura 2. Procedimiento gráfico general de construcción de micropilotes Bruce (1989) y Koreck (1978) 17	17
Figura 3. Tipos de Inyección. FHWA NHI-05-039 Chapter 2 – Micropile Classification Systems, December 2005 21	21
Figura 4. Línea de inyección de lechada para IR o IRS. Sireg ® 22	22
Figura 5. Micropilotes auto-perforantes. Ischebeck ® TITAN 24	24
Figura 6. Componentes de micropilotes autopercutores inyectados. Ischebeck ® TITAN 25	25
Figura 7. Prueba de carga a compresión, .FHWA NHI-05-039 Chapter 7 – Load Testing Systems, December 2005 26	26
Figura 8. Prueba de carga a compresión, ASTM D1143 26	26
Figura 9. Diferentes refuerzos en cabeza de micropilotes..... 32	32
Figura 10. Diferentes montajes pruebas de carga locales..... 34	34
Figura 11. Curva esfuerzo vs deformación de ensayo objeto de esta investigación..... 34	34
Figura 12. Ecuaciones básicas correlaciones c y ϕ del SPT. González, A (1999) 36	36
Figura 13. Esquema básico de micropilote. Bustamante, M., & Doix, B. (1985). 38	38
Figura 14. Ábaco el cálculo de q_s para gravas. Bustamante, M., & Doix, B. (1985)..... 41	41
Figura 15. Ábaco el cálculo de q_s para arcillas y limos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985)..... 41	41
Figura 16. Ábaco el cálculo de q_s para materiales calcáreos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985). 42	42
Figura 17. Esquema cuando el bulbo se pasa por varios estratos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985). 43	43
Figura 18. Rozamiento unitario límite. Figura 3.3 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera..... 50	50
Figura 19. Esquema general de un micropilote. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005 57	57
Figura 20. Falla en bloque. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005 65	65

Figura 21. Zapata equivalente suelos perfil homogéneo. Equivalent Footing Concept for Uniform Soil (after FHWA-NHI-05-042, 2005). FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005	66
Figura 22. Zapata equivalente suelos perfil con arcilla. Equivalent Footing Concept for Firm Soil Underlying Soft Soil Layer. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005	67
Figura 23. Gráfico para determinar índice de soporte. Bearing Capacity Index versus Corrected SPT Blowcount (modified after Hough, 1959). FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005	68
Figura 24. Gráfico carga última calculada Bustamante & Coix – prueba de carga vs número de prueba	91
Figura 25. Gráfico carga última calculada Bustamante & Coix – ϵ índice de desviación	91
Figura 26. Gráfico carga última calculada Guía Española – prueba de carga vs número de prueba	92
Figura 27. Gráfico carga última calculada Guía Española – ϵ índice de desviación	92
Figura 28. Gráfico carga última calculada FHWA– prueba de carga vs número de prueba	93
Figura 29. Gráfico carga última calculada FHWA – ϵ índice de desviación.....	93
Figura 30. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española – Residual y Saprolito de Migmatita	97
Figura 31. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española – Residual y Saprolito de Batolito	97
Figura 32. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española –Saprolito, transición y roca de Batolito.....	98
Figura 33. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española –Lleno.	99
Figura 34. Abaco de rozamiento unitario vs presión de inyección por perfil de suelo	102
Figura 35. Capacidad de carga promedio por metro lineal en perfil de suelo según meteorización (migmatita y batolito).....	103
Figura 36. Perforación con ensayo SPT	111
Figura 37. Perfil básico prediseño	112
Figura 38. Gráficas para determinar parámetros según (González, 1999).....	113
Figura 39. Perfil de diseño geológico geotécnico.....	114
Figura 40. Prueba de carga. Deformación vs Fuerza.....	116

Figura 41. Perfil geotécnico base 3089	124
Figura 42. Perfil geotécnico base 3091	124
Figura 43. Perfil geotécnico base 3106	124
Figura 44. Perfil geotécnico base 3110	125
Figura 45. Perfil geotécnico base 3113	125
Figura 46. Perfil geotécnico base 3114	126
Figura 47. Perfil geotécnico base 3135	127
Figura 48. Perfil geotécnico base 3136	127
Figura 49. Perfil geotécnico base 3144	129
Figura 50. Perfil geotécnico base ADC1	130
Figura 51. Perfil geotécnico base ADC2.....	130
Figura 52. Método Bustamante & Doix proyecto 3089.....	132
Figura 53. Método Bustamante & Doix proyecto 3091.....	133
Figura 54. Método Bustamante & Doix proyecto 3106.....	134
Figura 55. Método Bustamante & Doix proyecto 3110.....	134
Figura 56. Método Bustamante & Doix proyecto 3113.....	134
Figura 57. Método Bustamante & Doix proyecto 3114.....	135
Figura 58. Método Bustamante & Doix proyecto 3135.....	135
Figura 59. Método Bustamante & Doix proyecto 3136.....	136
Figura 60. Método Bustamante & Doix proyecto 3144.....	136
Figura 61. Método Bustamante & Doix proyecto ADC1	137
Figura 62. Método Bustamante & Doix proyecto ADC2	137
Figura 63. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3089.....	139
Figura 64. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3091.....	141
Figura 65. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3106.....	142

Figura 66. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3110.....	142
Figura 67. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3113.....	142
Figura 68. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3114.....	143
Figura 69. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3135.....	144
Figura 70. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3136.....	144
Figura 71. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3144.....	145
Figura 72. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto ADC1.....	145
Figura 73. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto ADC2.....	146
Figura 74. FHWA proyecto 3089.....	147
Figura 75. FHWA proyecto 3091.....	148
Figura 76. FHWA proyecto 3106.....	149
Figura 77. FHWA proyecto 3110.....	149
Figura 78. FHWA proyecto 3113.....	149
Figura 79. FHWA proyecto 3114.....	150
Figura 80. FHWA proyecto 3135.....	150
Figura 81. FHWA proyecto 3136.....	151
Figura 82. FHWA proyecto 3144.....	151
Figura 83. FHWA proyecto ADC1.....	152
Figura 84. FHWA proyecto ADC2.....	152

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de aspectos relevantes del Estado del Arte	11
Tabla 2. Detalles de clasificación de micropilotes por tipo de inyección. FHWA NHI-05-039 Chapter 2 Micropile Classification System. Details of Micropile Classification Based on Type of Grouting. (after Pearlman and Wolosick, 1992).	18
Tabla 3. Categoría de unidad de construcción. NSR-10.	27
Tabla 4. Número mínimo de ensayos según categoría. NSR-10.	27
Tabla 5. Factores de seguridad Indirectos FSICP Mínimos. NSR-100	28
Tabla 6. Carga aplicada dependiendo del tipo de prueba en función de DL. Armour, T. 2000. Recopilación de FHWA NHI-05-039 December 2005	28
Tabla 7. Recomendaciones de mínimo número de ensayos sobre micropilotes. Sabatini, P. Et al. 2005 FHWA NHI-05-039 Chapter 7 – Load Testing December 2005.....	29
Tabla 8. Valores de α Bustamante, M., & Doix, B. (1985).	40
Tabla 9. Selección de curvas en ábacos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).	42
Tabla 10. Factores de seguridad recomendados. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).	44
Tabla 11. Coeficientes F_c y F_ϕ . Tabla 3.1 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera	48
Tabla 12. Coeficiente F_r . Tabla 3.2 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera.....	51
Tabla 13. Resistencia unitaria de cálculo en el empotramiento en Roca (Grado ISRM ≤ 3). Tabla 3.2 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera.....	52
Tabla 14. Reducción de espesor de armadura por efecto de corrosión. Tabla 2.4 Capítulo 2. Materiales y productos. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera	54
Tabla 15. Pasos básicos de diseño, según FHWA. Table 5-1. Design Steps for Micropiles used for Structural Foundations. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005	58
Tabla 16. Resumen de resistencias suelo-lechada para diseño. Table 5-3. Summary of Typical bond (Grout-to-Ground Bond) Values for Micropile Design. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005.....	62
Tabla 17. Resumen de valores típicos de AB (enlace Lechada a Tierra) para el diseño de micropilote preliminar (modificado después de Sabatini, et al., 2005). Norma Colombiana de diseño de Puentes CCP-14.....	63

Tabla 18. Factores de eficiencia para grupos en suelos cohesivos. Table 5-3. Efficiency Factors for Micropile Groups in Cohesive Soils. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005	64
Tabla 19. Resumen de proyectos y pruebas de cargas.....	71
Tabla 20. Caracterización de micropilotes	72
Tabla 21. Resumen de pruebas de carga sobre micropilotes, información técnica	73
Tabla 22. Resumen de parámetros geotécnicos del suelo.....	81
Tabla 23. Resumen de especificaciones técnicas de acero de refuerzo de micropilotes	85
Tabla 24. Comparación de resultados entre pruebas de carga ejecutadas y cálculos de métodos analíticos.....	89
Tabla 25. Resultados Metodología Guía Española y pruebas de carga – longitud – diámetro – formación – método – presión de inyección.....	95
Tabla 26. Carga por metro lineal parametrizada.....	100
Tabla 27. Rozamiento unitario vs presión de inyección por perfil de suelo	102
Tabla 28. Parámetros estadísticos del Índice de desviación ϵ	104
Tabla 29. Corrección de NSPT según (González, 1999).....	113
Tabla 30. Cálculo capacidad a compresión	115
Tabla 31. Resultados de las propiedades índice para el nivel de suelo identificado.	122
Tabla 32. Parámetros de resistencia de la roca.....	123

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

En Colombia la construcción de micropilotes ha sido una técnica relativamente reciente. Se ha implementado en situaciones de difícil acceso tanto en recalce de estructuras existentes como en proyectos nuevos de cimentación. En el Valle de Aburrá algunas compañías consultoras en geotecnia fueron las primeras en comenzar a construir micropilotes de cimentación usando equipos o sondas de perforación para exploración. La funcionalidad del sistema comenzó a documentarse y con ella vino la tecnificación en la década de los 90. Existen muchas mitologías teóricas de cálculo de la capacidad portante a carga axial de compresión para pilotes y micropilotes, sin embargo, la mayoría de estas usan como entrada importante la información y parámetros geotécnicos que en ocasiones no están disponibles o son de poca confiabilidad, por lo cual se exige la ejecución de pruebas de carga físicas y directas para validar las hipótesis de diseño y verificar los resultados obtenidos de carga, asentamiento y comportamiento frente a las sollicitaciones del proyecto.

La validación de las hipótesis de diseño hace parte de la normatividad de los sistemas de micropilotes, sin embargo en el medio local existe poca aplicación frente a la documentación existente, procedimientos, ejecución, cálculos, análisis y conclusiones de los diferentes tipos de prueba. No existe un documento unificado e integral en la normativa colombiana que indique número y tipo de pruebas en un proyecto, su montaje, niveles de carga, ciclos, análisis de comportamiento de curva esfuerzo - deformación y menos aún una guía simplificada para aplicación de métodos de cálculos de capacidad portante a carga axial de compresión dependiendo de las condiciones y situaciones locativas, de materiales y equipos disponibles.

Este documento pretende hacer una aproximación a una metodología simplificada que permita escoger entre 3 métodos reconocidos de cálculo de capacidad de carga axial a compresión el que mejor se ajuste a las condiciones existentes en un proyecto definido en el área metropolitana del valle de Aburrá de la ciudad de Medellín, Colombia.

La investigación se basa en la construcción de micropilotes y ejecución de 26 pruebas de carga practicadas por el suscrito y 2 externas entre los años 2015 y 2016 en diferentes partes de Medellín y municipios cercanos. Las pruebas de carga fueron ejecutadas sobre micropilotes individuales aplicando la norma ASTM D1143.

Toda la información técnica como parámetros del suelo, condiciones locales y otros fueron recopilados, analizados y tratados para alimentar los 3 métodos mencionados. Posteriormente estos resultados fueron comparados con los encontrados en las pruebas de capacidad de carga teniendo en cuenta sus limitantes.

Los resultados comparados fueron analizados con criterios como tipo de micropilote (pre-barrenado o auto-perforante), tipos de suelo y estratificación. Con algunas observaciones fue posible definir cuál de los 3 métodos usados tuvo una mejor similitud a los resultados de las pruebas de carga lo cual permite presentar una propuesta para estimar con mayor certeza la capacidad de carga axial a compresión para condiciones localmente parecidas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema consiste en la dificultad de estimar capacidad de carga de un micropilote construido localmente con un alto grado de confiabilidad.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En nuestro medio y particularmente en Medellín, Antioquia, aunque el uso de micropilotes para cimentar edificaciones ha sido una práctica de ingeniería relativamente poco aplicada, en los últimos 10 años se ha intensificado y con ese auge se han evidenciado las limitaciones, falencias y errores cometidos por diseñadores y constructores en este campo.

Con esta investigación, se pretende contribuir en el entendimiento real y local para guiar a los participantes de los proyectos en la toma de decisiones más acertadas y acotadas. Así al momento de plantear cimentaciones en micropilotes perforados, se tenga un beneficio en la economía de los proyectos y aseguramiento de la calidad de los elementos, basados tanto en análisis teóricos como en datos empíricos locales.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Definir el mejor ajuste dentro de tres metodologías usadas para calcular de capacidad de carga axial a compresión sobre micropilotes perforados en suelos de dos formaciones representativas de Antioquia como batolito y migmatita en el Valle de Aburrá y Valle de San Nicolás, a partir de evaluaciones comparativas con los resultados de pruebas de carga realizados por compañías locales.

1.4.2 Objetivos específicos

- Parametrizar comportamiento de varios tipos de micropilotes perforados, usualmente usados en el medio local.
- Recopilar y revisar procedimientos y resultados de pruebas de carga de algunos micropilotes perforados.
- Realizar una evaluación comparativa entre los resultados de las pruebas de carga sobre micropilotes perforados y los valores esperados de capacidad de carga según las metodologías analíticas usadas.
- Plantear factores de seguridad para la capacidad de micropilotes con base en los resultados obtenidos.
- Aportar una metodología sencilla y práctica para estimar capacidad de carga de un micropilote en proyectos de muy poca información geotécnica básica, a partir de correlaciones de ensayo SPT y tres metodologías de diseño de micropilotes.
- Definir cuál metodología se ajusta de mejor manera a los proyectos analizados teniendo en cuenta la información geotécnica disponible.

1.5 METODOLOGÍA

El trabajo de grado inicia con una revisión del estado del arte, que consistió en la búsqueda y análisis de artículos, tesis de pregrados, tesis de Maestría y tesis de Doctorado, libros técnicos y publicaciones, que estudiaran aspectos de diseño, construcción y prueba de micropilotes perforados.

La información fue consultada en memorias de congresos, seminarios nacionales e internacionales, y en publicaciones técnicas, haciendo uso de las bases de datos disponibles.

Se consultaron 26 pruebas de carga realizadas por la compañía GEODIC y 2 por otras compañías en Medellín y otros municipios de Antioquia, Colombia.

Con el fin de alcanzar los objetivos del proyecto de grado, se propone un método de trabajo paso a paso que permite optimizar el tiempo para alcanzar los objetivos planteados, los pasos se describen a continuación.

- Revisión de la información disponible internacional.
- Revisión de la información disponible local.
- Organización de una base de datos donde se relacionen diámetro, carga de trabajo, longitud, presión y tipo de inyección, para cada micropilote del cual se

tenga prueba de carga y parámetros mecánicos del suelo y ubicación en un sistema tipo SIG o similar.

- Zonificar o acotar la información existente por macro-unidad de suelo identificable.
- A partir de la evaluación de las metodologías investigadas, planteamiento de modelos que permitan estimar curvas carga – deformación aproximada a los datos experimentales.
- Parametrización de los resultados en términos de zona, diámetro y carga de trabajo.
- Definición de una metodología para la estimación de capacidad de carga de un micropilote que sirva como base para tomar decisiones en obra y estimar costos/presupuesto para proyectos futuros.
- Presentar los resultados en un informe y realizar una presentación de modo que los directos implicados conozcan los resultados.

1.6 CONTENIDO

El documento está compuesto por 6 capítulos que están organizados de la siguiente forma.

Capítulo 1. Aspectos generales.

Este capítulo contiene introducción, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, y la metodología de investigación.

Capítulo 2. Marco teórico y antecedente

Presenta un marco teórico que ubique el tema en el contexto local, revisión de la información disponible y antecedentes del problema a resolver.

Capítulo 3. Métodos analíticos de capacidad de carga

En este capítulo se hace una recopilación, análisis y reflexión sobre algunos de los métodos analíticos disponibles que pueden ser aplicables al diseño de micropilotes perforados en el área de interés.

Capítulo 4. Pruebas de carga. Ensayos experimentales

Se hace una recopilación, parametrización y análisis de los resultados de 28 pruebas de carga ejecutadas en Medellín y otros municipios de Antioquia, Colombia.

Se les da tratamiento a los datos para poder ser usados en el siguiente capítulo.

- Revisar existencia y ajuste de estudio de suelos del proyecto.
- Validar que los registros de perforación exploratoria correspondan con los de construcción,
- Validar niveles de desplante final concuerden con los niveles de inicio de exploración y en caso tal realizar corrección.
- Revisar validez de resultados de ensayo SPT.
- Revisar existencia y confiabilidad de información de trazabilidad en construcción de los micropilotes.
- Revisar montaje y ejecución de prueba de carga contrastando con lo exigido en la normatividad. Las pruebas de carga que no cumplen con la ASTM 1143 por distancias entre apoyos de reacciones sean usadas dejando la limitación.
- Se presta atención igualmente a los procedimientos que se realizan en las pruebas de carga para validar su incidencia en los resultados de acuerdo a la normatividad que mejor aplique.

Capítulo 5. Comparación de métodos analíticos frente a resultados de pruebas de carga.

Este capítulo se encarga de confrontar y correlacionar los resultados encontrados con los modelados a partir de métodos analíticos con los resultados de los ensayos de prueba de carga disponibles y estudiados definiendo unos resultados y limitaciones.

Capítulo 6. Metodología propuesta.

Con base en los resultados obtenidos de la aplicación de las metodologías de cálculo revisadas y teniendo en cuenta las prácticas comunes de caracterización geotécnica en el medio local, se presenta a una metodología para el predimensionamiento de estos elementos, como la unión de corrección STP (González, 1999), junto con la metodología de cálculo que más se ajustó a las pruebas de carga (Dirección Técnica de la Dirección General de

Carreteras, 2005), aplicando las recomendaciones de la (FHWA, Micropile Design and Construction, 2005).

Capítulo 7. Ejemplo de aplicación de metodología propuesta.

Se presenta un ejemplo para la aplicación de la metodología propuesta usando datos del proyecto 3114 ubicado en el municipio de Sabaneta, Antioquia.

Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

Se presentan los resúmenes y se establecen resultados de correlaciones que sirvan para de una manera práctica estimar capacidad de carga de micropilotes perforados a partir de la experimentación local.

También se presentan las líneas que se pueden abrir para profundizar en el conocimiento y desarrollar nuevos métodos de cálculo y técnicas constructivas.

Anexo 1: Resumen de información técnica de proyectos

Anexo 2: Memorias de metodologías aplicadas a cada proyecto

Finalmente se presenta la bibliografía empleada para llevar a cabo el trabajo de grado.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

La primera referencia que se ha encontrado acerca de los micropilotes está en el libro de Sansoni (1963). Describe los “pali radice” como pilotes de pequeño diámetro, ejecutados con perforación a rotación y una tubería de entubación de unos 100 mm de diámetro, dentro de la que se coloca una armadura central (de una o más barras) manteniendo la presión de inyección del mortero o lechada, mientras se extrae la tubería de encamisado (opcional). Se utiliza una mezcla con una dosificación “elevada” de cemento y aditivos.

Se han desarrollado junto con la tecnología, diferentes técnicas de construcción de micropilotes que tienen sus ventajas o desventajas según sea el caso.

El término “micropilote” hace referencia al diámetro del elemento y es utilizado casi universalmente entendido como a pilotes ejecutados con técnicas diferentes de perforación. Hay una gran profusión de términos en diferentes idiomas (ROMANA M, 2003):

- Italiano “Pali radice”. “Micropali” (en singular “Pali radice”. “Micropalo”).
- Francés “Pieux racines”. “Pieux aiguilles”, “Micro pieux”.
- Inglés “Micropile”. “Minipile”. “Root pile”. “Needle pile”.
- Alemán “Wurzelpfähle”. “Verpresspfähle”.
- Portugués “Estaca raiz”

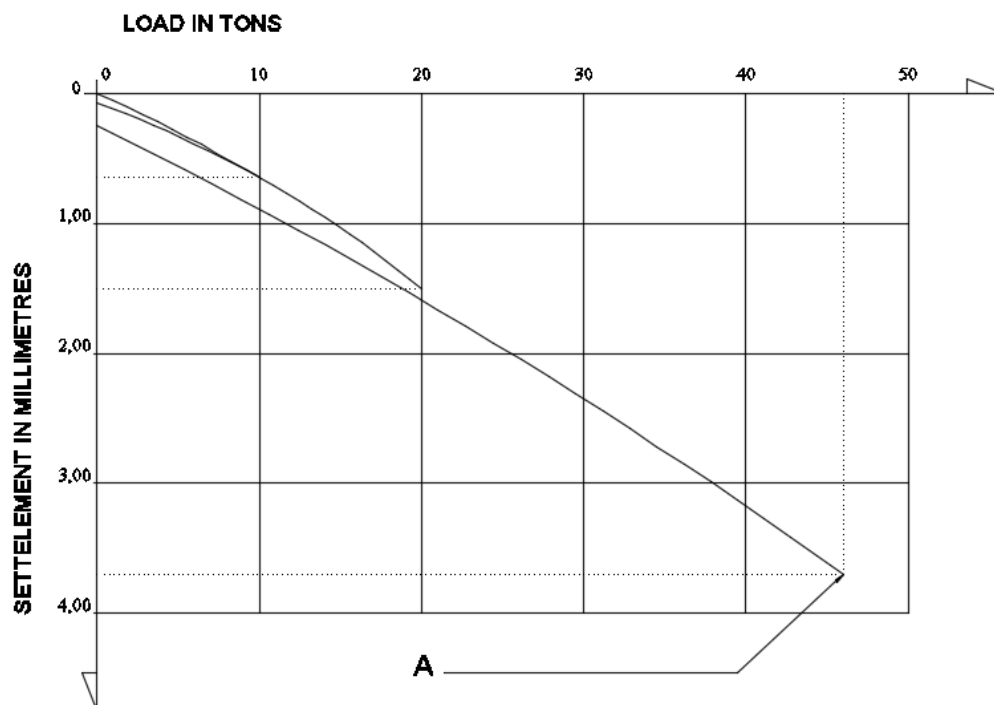
Se considera que el ingeniero civil Italiano Fernando Lizzi (2 enero 1914 - 28 agosto 2003) fue el inventor y pionero de la tecnología de micropilotes.

El ingeniero Lizzi comenzó a trabajar para la empresa SACIF en 1947, pero poco después se vinculó a Fondedile, donde permaneció como director técnico durante casi 50 años y obtuvo la primera patente de micropilotes en Italia en el año 1952.

Durante este tiempo, mientras, Italia en particular, y Europa en general, se estaba reconstruyendo después de la guerra, desarrolló la tecnología más tarde llamada “pali radice” (pila raíz, micropilotes) para la restauración de monumentos y edificios dañados en la Scuola Angiulli en Nápoles. Esta última fue la primera aplicación documentada del sistema donde se utilizaron “pali radice” de 13 m de longitud, 100 mm de diámetro nominal y una armadura central de una barra de 12 mm. El terreno estaba constituido por arenas, cenizas volcánicas y puzolanas. Este tipo de pilotes especiales o micropilotes son usados comúnmente cuando es necesaria la recimentación o recalce de edificios.

Lizzi así mismo, presentó los resultados del primer ensayo de carga que se muestran en la Figura 1. En el ensayo se alcanzaron 46 t de carga con algo menos de 4 mm de asentamiento

presentándose la fracturación del pie del pilote a esfuerzo de compresión de 45 MPa. En todo caso la curva carga-vs asentamiento denota un comportamiento elástico. El asentamiento remanente tras un ciclo carga-descarga (Lizzi, 1985) hasta 20 t fue del orden de 0,3 mm.



The first load test on a palo raice. A. crushing of the toe of the pile ($x=450 \text{ kg (cm}^2\text{)}$).

Figura 1. Curva Esfuerzo vs Deformación - Prueba de micropilotes en Napoles. (Lizzi, 1980).

Este buen desempeño causó sensación y el sistema se extendió rápidamente por Europa, siempre con resultados similares. Fondedile introdujo los “pali radice” en Inglaterra en 1962, en Alemania en 1965 y en USA en 1973 (mercado que abandonó en 1984 por razones económicas). Posteriormente en USA se comienzan a desarrollar otras técnicas de micropilotes como los autoperforantes “Hollow Bar” con una metodología estandarizada por la FHWA (Federal Highway Administration).

Durante la década 1960-1970 se usó el sistema en la construcción de algunas secciones del Metro de Milán y allí la Administración introdujo el término “micropali” para evitar el uso de un término que estaba patentado. En 1967 La compañía Rodio patentó un sistema alternativo,

denominado “Tubfix”, con inyección a través de tubos manguitos y armadura mediante un tubo metálico (Mascardi, 1968). El sistema sigue siendo ofertado por Rodio con el nombre comercial “Ropress”. A partir de la década 1980-1990 muchas empresas especializadas en cimentaciones ofrecen micropilotes de distinto nombre y con métodos de ejecución que, pueden tener algunas diferencias entre sí.

En Estados Unidos a veces se diferencia entre “minipile” con diámetro entre 150 y 250 mm, y “micropile” con diámetro menor de 150 mm (Herbert, 1985). También en el Norte de Europa se usa a veces el término “minipile”. En el año 1984 se crearon los micropilotes/anclajes TITAN por la empresa Ischebeck; autoperforantes de inyección de barras huecas o Hollow Bars. Varias patentes demuestran su base innovadora al conseguir utilizar la barra TITAN para la perforación del micropilote y como armadura del mismo. En la actualidad mundialmente existen muchos fabricantes y proveedores de barras autoperforantes como DSI, Arco, Sirive, Hutte, Sinodrill.

Entre las compañías más importantes dedicadas a la construcción de micropilotes, se destacan: Fondedile (Belgica), Rodio Swissboring (Suiza), Trevi SPA, -Vipp Lavori (Italia), Geocisa, Terratest, TerraBauer (España), Soletanche bachy, Freyssinet (Francia), DSI Dywidag Systems International, Strabag, Keller (Austria), Ischebeck (Alemania), Tecnasol (Portugal), Keller, Terratest, Geofix, Novatecna, Funda solos (Brasil), Matcon (USA).

En Colombia:

Geodic, Ischebeck - Colombia, Precomprimidos (Medellín), Centra (Cali), Anescol, Nacional de perforaciones (Bucaramanga), Geofundaciones, Soletanche Bachy Cimas Colombia (Bogotá).

Las normas vigentes y los lineamientos de ejecución y puesta a prueba sobre micropilotes se encuentran en los siguientes documentos:

Eurocódigo Norma UNE

ASTM-D1143 (2013) Prueba de carga a compresión

ASTM D3689 Prueba de carga a tracción

ASTM D3966: Prueba de carga lateral en la cabeza

Lineamientos o guías:

FHWA Micropile Design and Construction (USA 2005)

Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera, de la Serie Normativas e instrucciones de construcción del ministerio de fomento de España (España 2005)

2.1. ESTADO DEL ARTE

La información de referencia del estado del arte se consultó en bases de datos de revistas científicas electrónicas y en la Biblioteca de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín hasta el 3 de junio de 2017.

A continuación se presenta un resumen de aspectos relevantes de los documentos de interés en el tema.

Tabla 1. Resumen de aspectos relevantes del Estado del Arte

Item	Nombre	Autor / año	Ubicación	Aspecto relevante	Observaciones
1	Micropilotes en cimentaciones, Trabajo fin de grado, Escuela Universitaria politécnica grado Ingenierol Civil	Barba G, A. / 2012	Murcia, España	Historia y marco antecedente de la ejecución de micropilotes y pruebas de carga.	
2	Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas. Fórmulas analíticas y ensayos de carga. Tesis de maestría Ingeniería Geotecnia	Barreto, A. / 2011	Medellín, Colombia	Compara métodos analíticos con pruebas de carga sobre Pilotes hincados y no sobre micropilotes.	Enfoque interesante. Limitación en método constructivo y niveles de carga
3	Aporte a los sistemas de pilotes, nuevos métodos de análisis y evaluación de aspectos constructivos. Trabajo dirigido de grado. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.	Londoño, J.E / 2001	Medellín, Colombia	Elabora una recopilación bibliográfica de los métodos de Análisis de Cimentaciones Profundas dentro de la literatura, comparar física y numéricamente los diferentes métodos de análisis estáticos para el análisis de la Capacidad de Carga Última por Punta en Pilotes.	Estudia teóricamente la cimentación con pilotes o pilas que trabajan por punta. No aporta al tema de micropilotes por fuste
4	Análise de provas de carga estática em estacas pré-moldadas instrumentadas em depósitos argilosos. Tese de doutorado. Universidade federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.	Lopes, F / 2006.	Pernambuco, Brasil		
5	Reflexão sobre a análise de resultados de provas de carga estática. II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. UFG, Goiânia-GO	Camapum de Carvalho, J. Beneveli, R.M. Silva, C.M. Ferreira, E.S. Fernandes, R.M / 2005	Brasil		
6	Análises dos Resultados de Provas de Carga Estáticas sobre Fundações Profundas. Brasília-DF, Brasil: Universidade de Brasília.	Camapum de Carvalho, J. Medeiros, C. De Aquino, F.R. Andrade, L. Bezerra, N.M. Rocha, P.J; 2009.	Brasil		

Item	Nombre	Autor / año	Ubicación	Aspecto relevante	Observaciones
7	Análisis del proceso constructivo y variabilidad de parámetros geotécnicos en la capacidad de carga de micropilotes usando elementos finitos aleatorios	Mendoza, C. Ramos, A. Cunha, R. Lizcano, A	Brasil, Colombia	Variabilidad inherente de las propiedades geomecánicas del terreno influye en los desplazamientos de la pared debido a la perforación. A su vez, dichos desplazamientos generan disminución de la capacidad de carga. El radio se disminuye 88% alrededor de un 20%. El artículo permite dar una explicación racional al factor de seguridad, situación que mejora ostensiblemente el carácter subjetivo de factores sugeridos en códigos de diseño.	Limitación: No tiene buena resolución a profundidades más acordes a la realidad. Sólo aplica para un micropilote autopercutor tipo Anker
8	Efecto de la presión de inyección en el comportamiento axial de micropilotes instalados en suelos blandos, tesis de doctorado	Enrique Ortiz, R. / 2009	México	La similitud entre comportamiento mecánico de un micropilote inyectado y pilotes hincados debido a la transferencia de esfuerzos radiales en la zona central del elemento. Este documento usa la teoría de expansión de cavidades cilíndricas para mostrar como la inyección de lechada a presión en la zona media del micropilote genera esfuerzos radiales, incrementos de presión de poro, posterior disipación de la presión de poro y aumento de la resistencia al corte y capacidad axial.	
9	Sistema de cimentación en micropilotes, Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil	Galeano, J F. Hoyos, D. Vélez, A / 2003.	Medellín, Colombia	Hace una recopilación de técnicas constructivas de micropilotaje a nivel local. Acota las limitaciones que tiene la actividad en el medio local.	No analiza procedimientos de cálculos de capacidad portante o pruebas de carga
10	Considerações sobre a análise dos resultados de provas de carga estáticas	Camapum de Carvalho, J. Medeiros, C. Van Newton, H. González V, Y. Lara V, L / Fecha sin identificar	Brasilia, Brasil	Reporta que las pruebas de carga no son frecuentemente realizadas en Brasil, y cuando se ejecutan se limitan a encontrar capacidad de carga, sin embargo muestra análisis complementarios a tener en cuenta en el comportamiento del elemento.	
11	Publication FHWA NHI-05-039, Micropile Design and Construction	Federal Highway Administration / december 2005,	Estados Unidos	Documento guía	Es una de las metodologías que serán usadas en la presente investigación

Item	Nombre	Autor / año	Ubicación	Aspecto relevante	Observaciones
12	Guía Española para proyectos y la ejecución de micropilotes en obras de carretera de 2005	Secretaría de estado de estructuras y planificación, Dirección general de carreteras, Ministerio de fomento / 2005	España	Documento guía.	Es una de las metodologías que serán usadas en la presente investigación
13	Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés. Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 75-92.	Bustamante, M., & Doix, B. /1985	Francia	Documento guía y más usado en el medio local para micropilotes IRS.	Es una de las metodologías que serán usadas en la presente investigación
14	Método simplificado para la estimación de la carga última de pilotes sometidos a carga vertical axial en arenas	Díaz-Segura, E., / 2013	Chile	La respuesta de diferentes pilotes sometidos a carga vertical axial fue estudiada empleando una serie de análisis mediante elementos finitos, considerando como suelo de fundación diez tipos de arenas en condición seca y saturada.	
15	Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el Spt. X jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana - SCI -SCG – 1999.	González, A / 1999	Colombia	Emplea correlaciones para estimar los parámetros de resistencia al corte de los materiales con base en el ensayo de campo de resistencia a la penetración estándar, el cual permite obtener el valor del N_{spt} .	Es una herramienta muy importante para aplicar en la metodología de Bustamante y en otras a falta de los parámetros geotécnicos que correlaciona
16	Response of a single pile subjected to tension load by using softening models. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 54, No. 1, March, 2017. Russian Original No. 1, January-February, 2017).	Xu, F. Zhang, Q. Li, P L. Wang K., Zhang, S. He, P. / 2017	Rusia / China	Este artículo propone un modelo exponencial y un modelo exponencial doble para simular la relación entre el desplazamiento de un pilote y la fricción unitaria desarrollada en la interfase pilote-suelo. Analiza comportamiento de pilotes a tracción.	No presenta comparación con resultados de pruebas de carga a compresión.
17	Capacidad portante de pilotes empotrados en rocas considerando su aporte a fricción, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara. Cuba.	Quevedo, G. / 2015	Cuba	Muestra el estudio realizado de diferentes teorías existentes para considerar el aporte a fricción de pilotes empotrado en roca.	Tiene en cuenta pilotes hincados sobre roca que no aplica en la presente investigación, sin embargo muestra análisis de resultados de pruebas de carga de interés particular.
18	Research on influence of adjacent clay-layer thickness for the failure behavior and performance of the Meep pile under vertical compression. Journal of the Balkan Tribological Association Vol. 22, No 2A-II, 2151–2159 (2016).	Qian, Y. Yu, Y. Lu, T. Wang, R. / 2016	China	Hace una modelación con elementos finitos de pilotes MEEP (Multi-Extruded-Expanded-Plates) o pilotes con sección variable para analizar las deformaciones de suelos arcillosos estratificados.	Aunque ilustra pilotes muy diferentes a los objeto de este estudio, propone metodología para modelar el suelo en elementos finitos.

Item	Nombre	Autor / año	Ubicación	Aspecto relevante	Observaciones
19	Simulación de pruebas de carga en pilotes usando un modelo constitutivo hipoplástico	Ruge, J C. Pinto da Cunha, R. Rondón, H A. / 2014	Colombia	Simula mediante el uso de un programa basado en el método de elementos finitos aplicando modelo hipoplástico de Mašin (2005), los resultados obtenidos de pruebas de carga en pilotes individuales fundados en arcillas porosas de Brasília DF (Brasil), las cuales poseen características metaestables. Se ejecutaron cinco pilotes preexcavados mecánicamente con diámetro (ϕ) de 30 cm e instrumentados a lo largo del fuste con extensómetros eléctricos de resistencia.	El montaje no cumple distancias especificadas en ASTM 1143. Pero acoge recomendaciones de la norma NBR-12131 (ABNT, 1991b).
20	Pruebas de carga no destructivas en pilotes	Ibañez, L. (2008).	Cuba	Se establecen comparaciones entre los métodos teóricos de cálculo de la capacidad de carga del pilote hincado y aislado de 200 toneladas y modelos matemáticos, así como los resultados de la pruebas de carga a escala real.	Se aplica un modelo de elementos finitos para analizar solo un pilote hincado. Las deformaciones obtenidas a partir de la prueba de carga coinciden ingenierilmente con el modelo
21	Diseño y aplicación de pilotes CFA para una central eléctrica en Coronel, Chile	Raddatz, D. Miranda, R. Taiba, O. / 2014	Chile	Describen los métodos para estimar la capacidad axial los pilotes pre excavados CFA (Continuous Flight Auger) según la norma estadounidense FHWA 1999.	La norma DIN 4014 trata el diseño de pilotes CFA dentro del diseño de pilotes pre-excavados, en el cual se determina la resistencia del pilote mediante tablas de origen empírico predeterminadas, que reflejan las condiciones de un suelo favorable. Esta norma puede ser utilizada cuando no se disponga de pruebas de carga ni experiencia en el lugar
22	A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension. Memorial University of New Foundland.	Han, J. Ye, S-L. / 2008	Canadá	Presenta un estudio de campo sobre el comportamiento de micropilotes individuales en arcilla blanda sometidos a compresión o tensión	Los micropilotes se instrumentaron con medidores de deformación de corrugado, y fueron monitoreados durante el progreso de la carga. Los datos indicaron que la capacidad máxima del eje de los micropilotes bajo tensión era aproximadamente el 60% de aquellos bajo compresión Excluyendo la resistencia de la punta.

Item	Nombre	Autor / año	Ubicación	Aspecto relevante	Observaciones
23	Axial Monotonic and Cyclic Compression Behaviour of Hollow Bar Micropiles. University of Western Ontario - Geotechnical Testing Journal.	El Hadi Drbe, O. / 2014	Canadá	En este trabajo de escala real se realizaron pruebas de carga con el fin de: evaluar la idoneidad del diseño FHWA para micropilotes de barra hueca (autoperforante) instalados en suelo cohesivo para evaluar la rendimiento de los micropilotes de la barra hueca construidos con relación diámetro de broca/ barra hueca de 3,0.	La fricción final media fue de aproximadamente 1 a 1,25 veces la resistencia al corte no drenada para micropilotes con una broca de 228 mm y 1,6 veces la resistencia al corte no drenado para micropilotes con una broca de 178 mm debido a la diferencia en el tamaño de la boquilla, lo que dio lugar a una mayor presión para el caso de la broca de 178 mm. Es un artículo orientado al control y predicción de mejoras en capacidad portantes en producción de micropilotes autoperforantes
24	Analytical solution for micropile design under tension and compression. University of Missouri-Kansas City, Kansas City, Missouri, U.S.A. Geotechnical and Geological Engineering 22: 199–225, 2004. 199 # 2004 Kluwer Academic Publishers. Netherlands.	Misra, A. Chen, C-H. / 2003	Usa	Los cálculos del modelo se comparan con medición de campo de la curva carga-desplazamiento. Los datos de carga-desplazamiento de micropilotes medidos disponibles en la literatura se analizan para evaluar los parámetros del modelo	Muy importante el vínculo entre micropilote y el suelo. Se muestra un método para predecir curva carga-deformación basado en datos disponibles pero no se muestran dichos datos.
25	Provas de carga em estacas pré-moldadas ensaiadas em areias porosas, universidade federal de Lavras. Revista Escola Minas vol.57 no.4 Ouro Preto Oct./Dec. 2004.	Maia, M. Telo, F. Ribeiro, K. De Carvalho, D. (2004)	Brasil	En ese trabajo, se construyeron estacas prefabricadas de concreto, instrumentadas, especialmente confeccionadas para esa investigación. Estas estacas fueron clavadas en suelo arenoso de alta porosidad, colapsable, situado en la región oeste del Estado de São Paulo. Diversas pruebas de carga axiales, estáticas, se efectuaron en seis estacas (por ensayos de compresión, tracción y carga horizontal). Se realizaron, además, ensayos geotécnicos de laboratorio y de campo en esos suelos, con el propósito de mejor caracterizar el campo experimental estudiado	

2.2. MICROPILOTES

La característica principal de un micropilote perforado es su diámetro pequeño que puede alcanzarse con equipos relativamente pequeños, en comparación con los sistemas de pilotaje tradicionales con equipos muy grandes y pesados (de más de 20 toneladas).

Un micropilote se construye con una máquina de perforación que básicamente ejecuta un agujero, instala en el suelo un refuerzo de acero, y con un equipo de inyección de lechada o grout que inyecta el compuesto en agujero cubriendo el refuerzo y poniéndolo en trabajo con el suelo.

Los micropilotes se pueden utilizar bajo condiciones muy restrictas del acceso y ubicación por el tamaño de los equipos usados comparados con equipos más grandes como piloteadoras, y pueden proporcionar no solamente una ayuda estructural excelente sino también posibilidad de ingresar a sitios de espacios pequeños.

Adicionalmente, los micropilotes pueden ser aplicados a cualquier tipo de suelo y formación. En depósitos con altos contenidos de rocas, arenas y materiales difíciles de excavar, con presencia de nivel freático, o en roca cuando se requiere de componente a tracción por resistencia friccional.

Un micropilote se puede definir como una perforación cilíndrica de pequeño diámetro (≤ 300 mm) que se refuerza mediante la introducción de una armadura metálica formada por barras de acero corrugado o helicoidal, tuberías cilíndricas o perfiles de acero, quedando dicho conjunto solidario al terreno mediante una inyección a presión de una lechada de cemento o mortero llamada grout. Ver Figura 2.

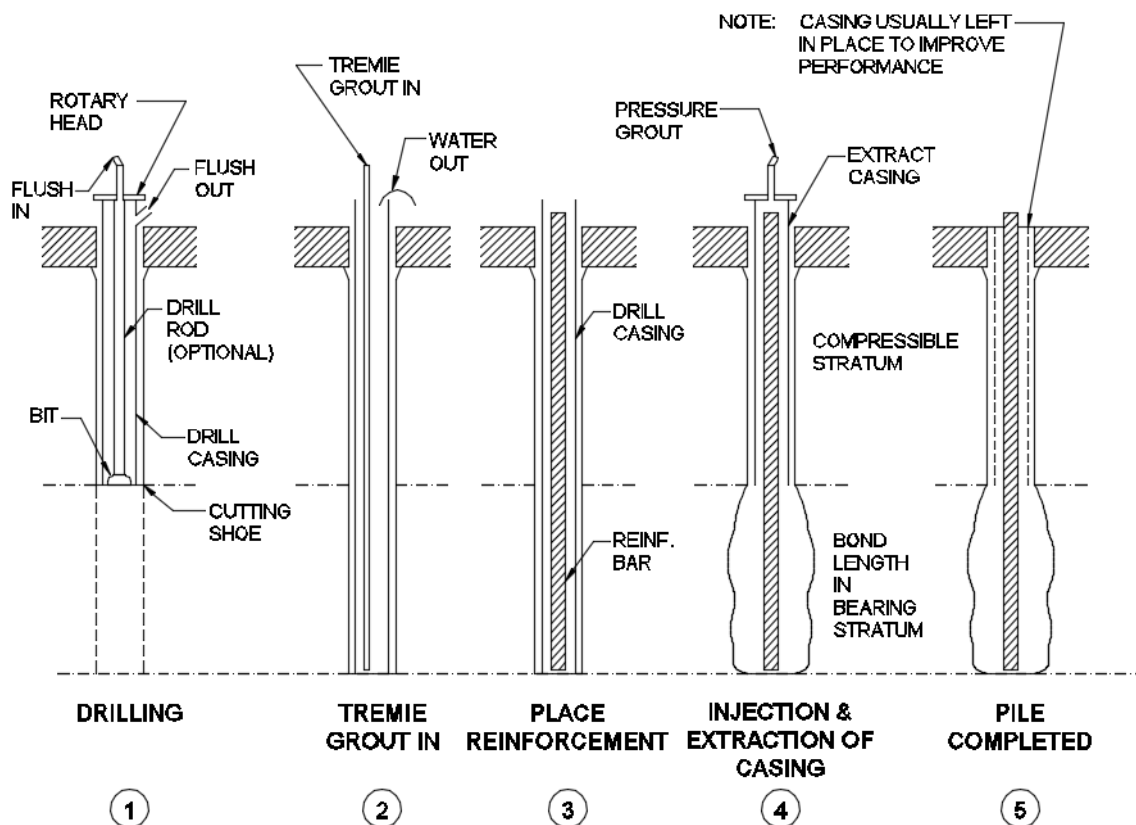


Figura 2. Procedimiento gráfico general de construcción de micropilotes Bruce (1989) y Koreck (1978)

Lechada o Grout.

Mezcla de agua y cemento con una dosificación que depende del diseño estructural, condiciones del terreno y criterios de trabajabilidad. Frecuentemente, varía entre $A/C = 0.40 - 0.55$, para obtener resistencias del orden de 210 kg/cm^2 (21 MPa) a los siete días y superior a 250 kg/cm^2 (25 MPa) a los 28 días. Se usan equipos de inyección (turbo-mezclador, agitador y bomba). En ocasiones, se permiten aditivos acelerantes y fluidificantes.

Tabla 2. Detalles de clasificación de micropilotes por tipo de inyección. FHWA NHI-05-039 Chapter 2 Micropile Classification System. Details of Micropile Classification Based on Type of Grouting. (after Pearlman and Wolosick, 1992).

Micropile Type and Grouting Method	Sub-type	Drill Casing	Reinforcement	Grout
Type A Gravity grout only	A1	Temporary or unlined (open hole or auger)	None, single bar, cage, tube or structural section	Sand/cement mortar or neat cement grout tremied to base of hole (or casing), no excess pressure applied
	A2	Permanent, full length	Drill casing itself	
	A3	Permanent, upper shaft only	Drill casing in upper shaft, bar(s) or tube in lower shaft (may extend full length)	
Type B Pressure - grouted through the casing or auger during withdrawal	B1	Temporary or unlined (open hole or auger)	Monobar(s) or tube (cages rare due to lower structural capacity)	Neat cement grout is first tremied into drill casing/auger. Excess pressure (up to 1 MPa (145 psi) typically) is applied to additional grout injected during withdrawal of casing/auger
	B2	Permanent, partial length	Drill casing itself	
	B3	Permanent, upper shaft only	Drill casing in upper shaft, bar(s) or tube in lower shaft (may extend full length)	
Type C Primary grout placed under gravity head, then one phase of secondary "global" pressure grouting	C1	Temporary or unlined (open hole or auger)	Single bars or tube (cages rare due to lower structural capacity)	Neat cement grout is first tremied into hole (or casing/auger). Between 15 to 25 minutes later, similar grout injected through tube (or reinforcing pipe) from head, once pressure is greater than 1 MPa (145 psi)
	C2	Not conducted	–	
	C3	Not conducted	–	
Type D Primary grout placed under gravity head (Type A) or under pressure (Type B). Then one or more phases of secondary "global" pressure grouting	D1	Temporary or unlined (open hole or auger)	Single bars or tube (cages rare due to lower structural capacity)	Neat cement grout is first tremied (Type A) and/or pressurized (Type B) into hole or casing/auger. Several hours later, similar grout injected through sleeved pipe (or sleeved reinforcement) via packers, as many times as necessary to achieve bond
	D2	Possible only if regROUT tube placed full-length outside casing	Drill casing itself	
	D3	Permanent, upper shaft only	Drill casing in upper shaft, bar(s) or tube in lower shaft (may extend full length)	

2.2.1. Fundamentos teóricos de micropilotes

Los procedimientos de cálculo tendientes a estimar la capacidad de una cimentación profunda, están asociados con la resistencia al corte del suelo en el cual se introduce el elemento y al control de asentamientos.

Existen diversos métodos teóricos de cálculo de esfuerzos y reacciones para un pilote que han sido usados durante años, como también programas computacionales que se encargan de su diseño, utilizando métodos de cálculo como el de elementos finitos y teoría de fundaciones. Para la determinación de la capacidad de carga se han desarrollado fórmulas y criterios con base en experiencias locales y/o estudios minuciosos que pueden agruparse en las tres clases descritas a continuación:

- Métodos dinámicos.
- Ensayos de penetración.
- Métodos analíticos.

En la ingeniería de cimentaciones se tiende a considerar que existe una relación directa entre los procedimientos de cálculo que estiman la capacidad de un sistema de fundación profunda y la resistencia al corte del suelo y el control de los asentamientos.

Es relevante entonces, saber que el comportamiento mecánico de una masa de suelo es complejo y dar un concepto adecuado sobre el tipo de cimentación a implementar a cualquier proyecto ingenieril, debe estar basado en un minucioso estudio que brinde la información necesaria para garantizar la seguridad de la estructura.

La expresión general que ha sido habitualmente utilizada para el cálculo de capacidad de carga última de un pilote individual denominada Q_{ult} , es definida como el aporte desarrollado por la punta del elemento más la fricción generada en el fuste del mismo.

$$Q_{ult} = Q_{fricción} + Q_{punta}$$

$$Q_{punta} = A_p \times q_p$$

$$Q_{fricción} = A_f \times q_f$$

La forma de calcular las capacidades de carga por fricción y por punta depende del autor, su experimentación o su desarrollo teórico.

2.2.2. Micropilotes Pre-Barrenados

Esta técnica consiste en perforar o pre-barrenar un agujero, sostener o mantener el pozo abierto con lodos estabilizadores o camisas de revestimiento y posteriormente instalar el refuerzo del micropilote. Se reconoce como la técnica más común y usada.

- Mayor experiencia de constructores locales.
- Puede haber inyecciones secundarias, selectivas y repetitivas.

Inyección de lechada

La lechada típica usada en la práctica es una mezcla de agua limpia y cemento con una relación de agua/cemento (w/c) entre 0.40 y 0.55. Es posible en algunos casos que se agregue arena para disminuir el costo de la mezcla.

Existen varios tipos de inyección a usar dependiendo de la capacidad de carga esperada el tipo de suelo a perforar, la permeabilidad del mismo, consumos admisibles de cemento, entre otras variables (ver Tabla 2, Tabla 16 y Figura 3).

Tipo A: Gravedad

Tipo B: IGU (Inyección Global Única)

Tipo C: IR (Inyección Repetitiva)

Tipo D: IRS (Inyección Repetitiva Selectiva)

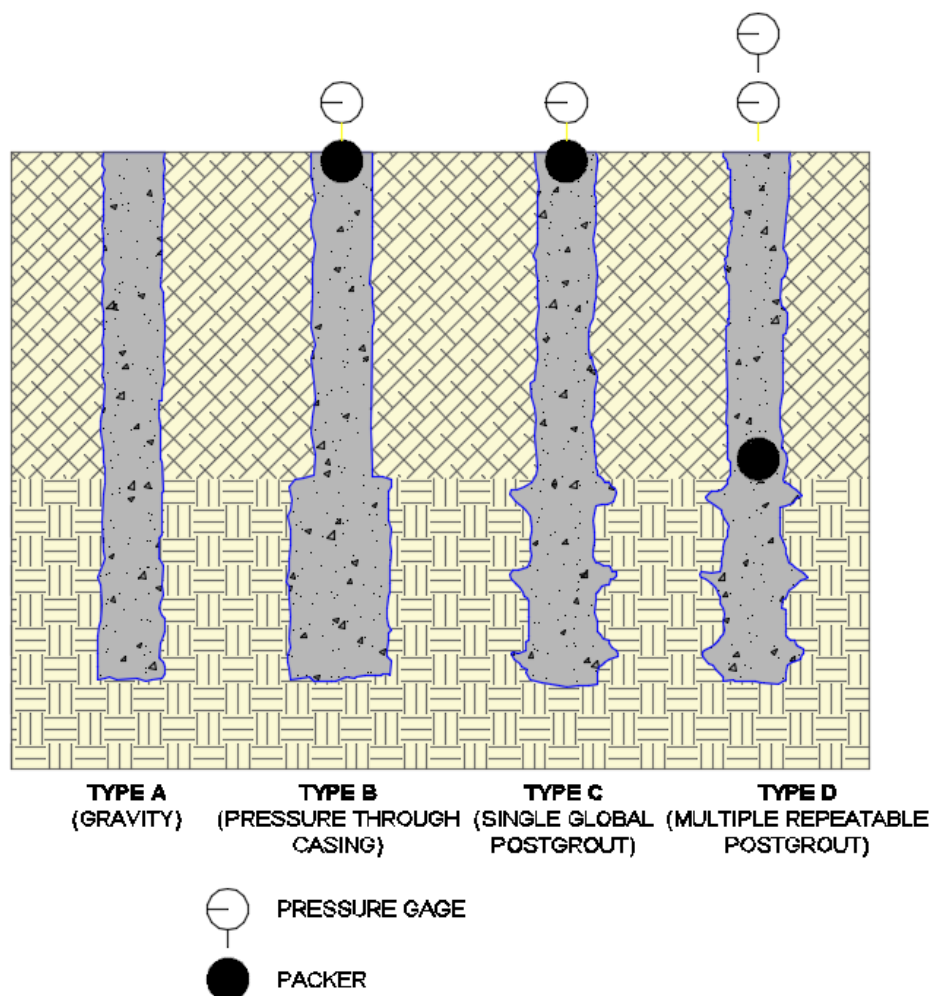


Figura 3. Tipos de Inyección. FHWA NHI-05-039 Chapter 2 – Micropile Classification Systems, December 2005

La inyección repetitiva se utiliza en los casos en los que se necesita aumentar el diámetro del bulbo en suelos permeables. Aunque es más costosa que la inyección única global, la capacidad de carga de estos aumenta notablemente en comparación con los últimos. Las inyecciones globales funcionan muy bien en suelos arcillosos con pocas probabilidades de colapso del pozo y que no son susceptibles de expansión. Ver Figura 3.

La inyección se realiza en etapas repetidas. Después de que la primera lechada se haya inyectado y fraguado, se vuelve a inyectar a presión a través de las válvulas de anti-retorno de la línea de inyección para una zona definida por los inyectores internos.



Figura 4. Línea de inyección de lechada para IR o IRS. Sireg®

Procedimiento general para la Construcción de micropilotes prebarrenados Tipo D (ver Tabla 2)

- Paso 1 Perforación del micropilote. Se efectúa por roto-percusión. En principio no parece necesario emplear encamisado, aunque en caso de ser necesaria se realizaría. Se deben analizar las condiciones de estabilidad de paredes y presencia de nivel freático.
- Paso 2 Introducción de la armadura. La armadura se introducirá en el pozo perforado, su extremo inferior está cerrado.
- Paso 3 Inyección exterior del micropilote. Se introducirá un tubo de inyección hasta la máxima profundidad del micropilote y se procederá a la inyección del mismo hasta que la lechada aflore limpia por la boca del micropilote.
- Paso 4 Inyección controlada de válvulas. Una vez finalizada la inyección exterior del micropilote se esperará hasta que comience el fraguado de la misma para asegurar que la columna de lechada exterior actúe como obturador que evite la fuga de la lechada controlada entre la armadura y la superficie de la perforación. Transcurrido este periodo se procederá a inyectar la primera válvula para lo cual será preciso colocar un obturador mecánico. El sistema de inyección controlada precisa la utilización de un doble obturador que aisle la zona de válvula del resto de del interior de la tubería o línea de inyección..

2.2.3. Micropilotes Auto-perforantes

Ésta técnica utiliza una tubería - barras de acero para el refuerzo y como tubería de perforación e inyección.

La perforación se realiza con la misma armadura estructural que formará parte del futuro micropilote o anclaje. Son barras de acero helicoidal y manguitos de unión. Estas barras de acero están disponibles en un amplio abanico de diámetros cubriendo las sollicitaciones de carga dentro de los rangos de micropilotes.

Las barras de acero son huecas por dentro y se unen entre sí con manguitos de unión roscados de capacidad resistente superior a las barras que unen. En la punta de perforación va una broca trialeta, de arco o de botones de acero o carburo a pérdida, que varía según el tipo de terreno que se perfora.

Durante todo el proceso de perforación se inyecta un caudal adecuado de agua-lechada de cemento, que sale por las toberas en la parte posterior de la broca de perforación. La lechada de cemento se inyecta a presión y se hace más densa a medida que avanza la perforación, Todo el material granular removido durante la perforación y el adyacente se impregna de la lechada de cemento formando el micropilote en cuyo eje se encuentra la barra de acero estructural.

Este tipo de micropilote es especialmente demandado en terreno granular. Permite unas producciones diarias muy altas ya que evita el uso de entubación recuperable, en terrenos colapsables.



Figura 5. Micropilotes auto-perforantes. Ischebeck ® TITAN

Para este sistema de micropilotes pueden usarse las siguientes técnicas de inyección de lechada (ver Figura 3 y Tabla 2).

Tipo A: Gravedad

Tipo B: IGU (Inyección Global Única)

Tipo E: Simultánea. Se inyecta lechada pobre ($A/C=1$) al mismo tiempo que se autopera, al finalizar este paso se termina barrido con Tipo B (resistencias similares a la Tipo D o IRS).

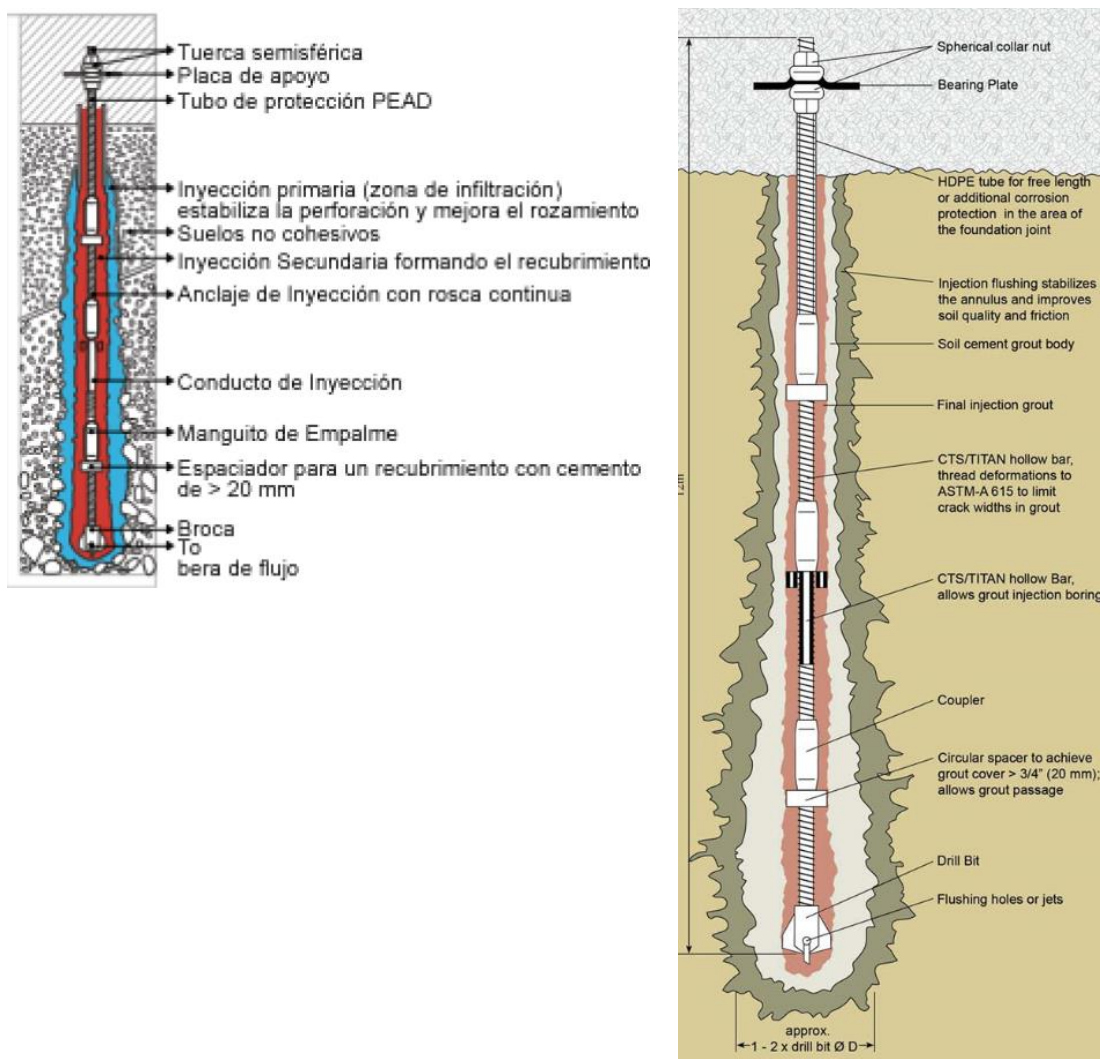


Figura 6. Componentes de micropilotes autopercorantes inyectados. Ischebeck ® TITAN

2.3. PRUEBAS DE CARGA

La capacidad portante de un micropilote instalado depende de factores muy variados como el tipo de inyección, la calidad de la instalación e inyección por lo cual resulta difícil establecer su valor con una metodología de diseño, por lo que se acude a la prueba del micropilote construido para establecer con mayor precisión los factores de seguridad.

La función del micropilote consiste en recibir en su cabeza una carga de la superestructura y transferirla al suelo que lo rodea a través de toda su longitud.

La prueba de carga es un método que permite determinar la carga máxima de un pilote o micropilote y contrastarlo tanto con el valor de carga proyectado con el diseño, como con los asentamientos esperados y permisibles, según la normatividad vigente.

En el ensayo a compresión (ASTM D1143): la carga es aplicada mediante un gato hidráulico apoyado bajo una viga que está anclada mediante micropilotes, pilas o anclajes de reacción al terreno o mediante un gato bajo una plataforma con un peso sobre ella.

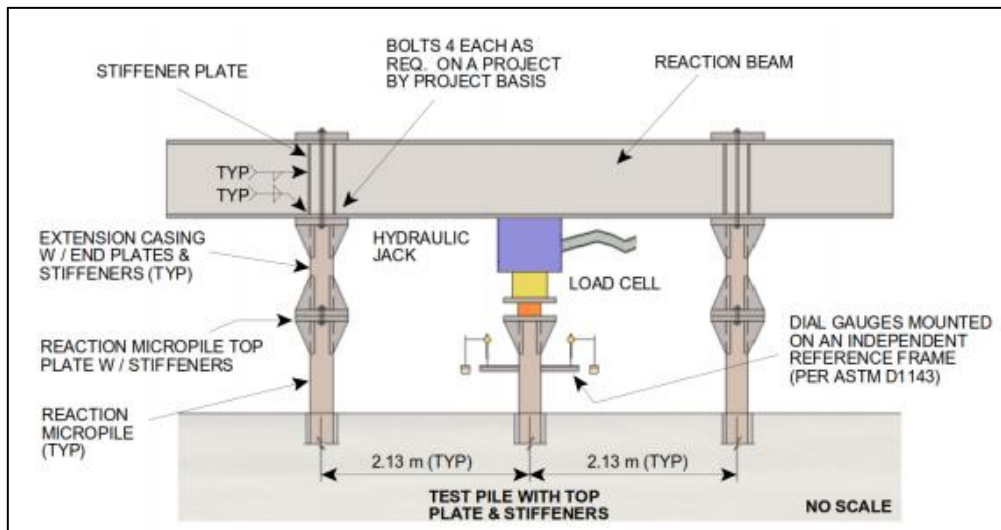


Figura 7. Prueba de carga a compresión, .FHWA NHI-05-039 Chapter 7 – Load Testing Systems, December 2005

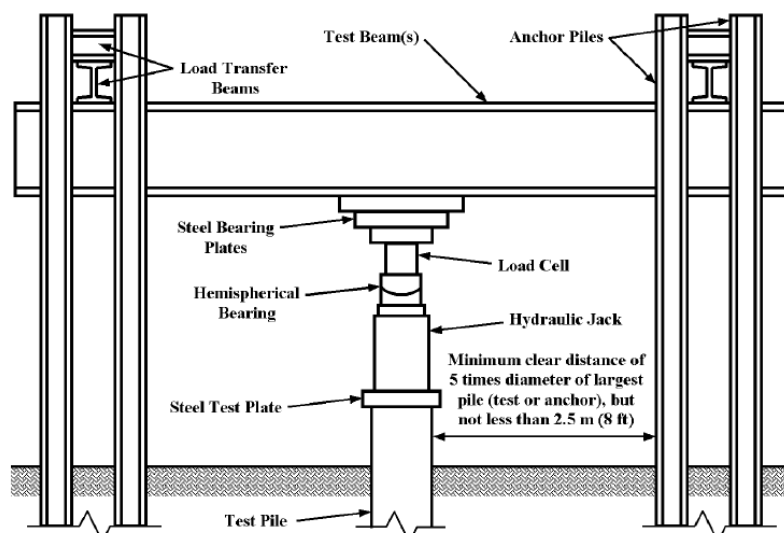


FIG. 1 Schematic of Hydraulic Jack Acting Against Anchored Reaction Frame

Figura 8. Prueba de carga a compresión, ASTM D1143

Para establecer el número de pruebas de carga en un proyecto, se debe definir la categoría del mismo y el número de micropilotes de producción, ver Tabla 3.

Tabla 3. Categoría de unidad de construcción. NSR-10.

Categoría de la unidad de construcción	Según los niveles de construcción	Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800 kN
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801 y 4,000 kN
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4,001 y 8,000 kN
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8,000 kN

Una vez definida la categoría se procede a definir el número de pruebas de carga a realizar (ver Tabla 4).

Tabla 4. Número mínimo de ensayos según categoría. NSR-10.

Categoría	No de Pruebas
Baja	≥ 1
Media	≥ 2
Alta	≥ 3
Especial	≥ 5

Con base en los resultados de las pruebas de carga se deben establecer los factores de seguridad para diseño de la fundación, todo lo anterior basado en el Capítulo H reglamento NSR-10 colombiano.

En este caso los factores de seguridad mínimos podrán reducirse sin que lleguen a ser inferiores al 80% de los indicados en la Tabla 5 o tabla 4.7.1 de la NSR-10.

Tabla 5. Factores de seguridad Indirectos F_{SICP} Mínimos. NSR-100

Condición	F_{SICP} Mínimo
	Diseño
Carga Muerta + Carga Viva Normal	3.0
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	2.5
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.5

2.3.1. Tipos de prueba

Dependiendo del momento de ejecución del ensayo dentro de la programación de obra, se presentan dos tipos de prueba de carga que están en función del factor de seguridad aceptado en dicho momento de la obra y se presentan en los numerales 2.3.1.1 Ensayo de verificación y 2.3.1.2 Ensayo de prueba:

Tabla 6. Carga aplicada dependiendo del tipo de prueba en función de DL. Armour, T. 2000. Recopilación de FHWA NHI-05-039 December 2005

	Verification Test	Proof Test
Micropiles	$2.5 \times DL$	$1.67 \times DL$
Soil Nails	$2.0 \times DL$	$1.5 \times DL$
Ground Anchors		$1.33 \times DL$
DL = Design Load = <i>unfactored</i> controlling pile design load		

Tabla 7. Recomendaciones de mínimo número de ensayos sobre micropilotes. Sabatini, P. Et al. 2005 FHWA NHI-05-039 Chapter 7 – Load Testing December 2005

Table 7-3. Recommendations on Minimum Number of Test Micropiles for Proof Testing.	
Application	Proof Test Frequency
Underpinning Applications	1 micropile proof test per substructure unit
Seismic Retrofit	1 micropile proof test per substructure unit
Structural Support of New Construction	1 micropile proof test per substructure unit, but not less than 5 percent of total production micropiles
Slope Stabilization	2 percent of total production micropiles to a test load of 2.0 times P_{ult} (P_{ult} is defined in Eq. 6-1 in Chapter 6)

For magnitude of test loading (for structural support applications), this manual recommends:

Verification load testing to 2.0 × Design Load

Proof load testing to 1.6 × Design Load.

La Norma ASTM D1143 presenta 8 procedimientos para elaborar pruebas de carga a compresión:

- Procedimiento A: Quick Test (Ensayo rápido)
- Procedimiento B: Maintained Test (Ensayo de carga mantenida - opcional)
- Procedimiento C: Loading in Excess of Maintained Test (Ensayo de carga en exceso mantenida - opcional)
- Procedimiento D: Constant Time Interval Loading Test (Ensayo de carga de intervalo de tiempo constante - opcional)
- Procedimiento E: Constant Rate of Penetration Test (Ensayo de tasa constante de penetración opcional)
- Procedimiento F: Constant Movement Increment Test (Ensayo de incremento constante de movimiento - opcional)
- Procedimiento G: Cyclic Loading Test (Ensayo de carga cíclica - opcional)

Los procedimientos usados en la mayoría de los ensayos presentados en este documento fueron el A y G en combinación, es decir, aplicando el procedimiento A se hacen incrementos

de carga del 5% con mantenimiento de la misma en intervalos entre 4 y 15 minutos (frecuentemente usados intervalos de 6 minutos), esto se aplica en varios ciclos según el procedimiento G.

En algunos otros casos de esta investigación, se usó el procedimiento B y G en combinación. Ensayo en varios ciclos de carga con incrementos del 25% en intervalos más largos de hasta 2 horas o hasta cuando la velocidad de asentamiento fuese inferior a 0.25 mm/hora, al alcanzar la carga máxima se mantiene durante 12 horas, luego se descarga con decrementos de 50% en intervalos de 30 minutos.

Los procedimientos B al F se establecen como opcionales y se realizan para verificar comportamiento creep que se evidencia cuando existen deformaciones que evolucionan con el tiempo a tensión constante una vez aplicada la carga. Este comportamiento se busca en suelos arcillosos o de alta plasticidad.

El procedimiento G se realiza como preferencia para revisar el comportamiento del elemento ante cargas cíclicas como las de sismo y medir su deformación residual en cada ciclo de carga.

El objetivo de las pruebas de carga es verificar la capacidad de diseño. Para los dos siguientes tipos de ensayo aplican los procedimientos citados anteriormente.

2.3.1.1. Ensayo de verificación

Este ensayo, se ejecuta en el primer micropilote instalado en el proyecto junto con los necesarios de reacción. El objetivo es llevarlo a la falla para determinar la carga última y se somete el micropilote a una carga entre 2,0 (Sabatini et al, 2005) y 2,5 veces la carga admisible de diseño (DL) donde se estima que se encuentre la falla de acuerdo a los cálculos. La relación entre la carga última UL alcanzada en la prueba de carga y la carga de diseño DL será el factor de seguridad del ensayo de verificación. El elemento se pierde y no aporta como capacidad de carga a la cimentación.

2.3.1.2. Ensayo de prueba

Este ensayo, se realiza sobre micropilotes de producción, es decir durante y después de la ejecución de los mismos. Se estima llevar el ensayo de prueba entre 1,6 y 1,67 veces la carga de diseño (DL) la cual debe estar por debajo de la carga última de rotura UL para que el elemento quede funcional y aportando a la cimentación. Se debe contar con pruebas previas de micropilote llevado a la falla para tener punto de referencia de la ejecución de esta prueba, pues siempre queda la incertidumbre de no conocer la capacidad última del elemento.

Es un ensayo no destructivo para control de calidad y aseguramiento de la capacidad de carga.

2.3.1.3. Características de la prueba de carga

2.3.1.3.1. Equipos y herramientas

Los equipos regularmente empleados para la ejecución de los ensayos son los siguientes:

- Vigas de acero
- Varillas de acero de 1"
- Gato hidráulico
- Bomba hidráulica de tensionamiento
- Manómetro de presión hidráulica
- Herramienta menor

2.3.1.3.2. Características de los micropilotes

Dependiendo de las condiciones y necesidades de la obra, los micropilotes pueden variar en su proceso de instalación, sean con varillas de acero macizo o barras huecas autoperforantes. En cualquier caso el micropilote deberá tener como mínimo 14 días de fraguado en su lechada inyectada para poder ejecutar la prueba de carga, acompañado con un encamisado de acero vaciado con mortero acelerado en la cabeza del micropilote, el cual se encarga de los esfuerzos a cortante y flexurales para evitar problemas de pandeo durante la prueba y el servicio en algunas estructuras, además sirve como soporte del gato hidráulico para transmisión de cargas, el cual va apoyado en una platina de acero.



Figura 9. Diferentes refuerzos en cabeza de micropilotes

2.3.1.3.3. Montaje prueba de carga

Ya definido el punto de prueba y sus reacciones, se define el tipo de montaje más adecuado a la luz entre reacciones siguiendo la norma ASTM D1143.

Cada prueba de carga deberá tener un diseño de montaje de reacciones acorde a su necesidad, dependiendo del tipo de micropilote y la luz entre reacciones de no ser posible el cumplimiento del particular frente a la ASTM D1143. Para estos montajes, se recomienda de forma generalizada usar 4 reacciones, sin embargo, en particularidades del espacio y recurso disponible podrán usarse como mínimo 2 reacciones.

Se realizan normalmente de 3 a 4 ciclos de carga entre el 5% y el 250% de la carga de diseño del micropilote dependiendo el tipo de ensayo, en intervalos que van de 1 a 10 minutos

La carga será definida por la presión ejercida por el equipo de tensionamiento multiplicada por el área interna de contacto del gato hidráulico.

La deformación de asentamiento en el micropilote de prueba y de extracción en las reacciones es registrada por los micrómetros instalados. De esta forma se tendrá registro de la carga vs la deformación.





Figura 10. Diferentes montajes pruebas de carga locales

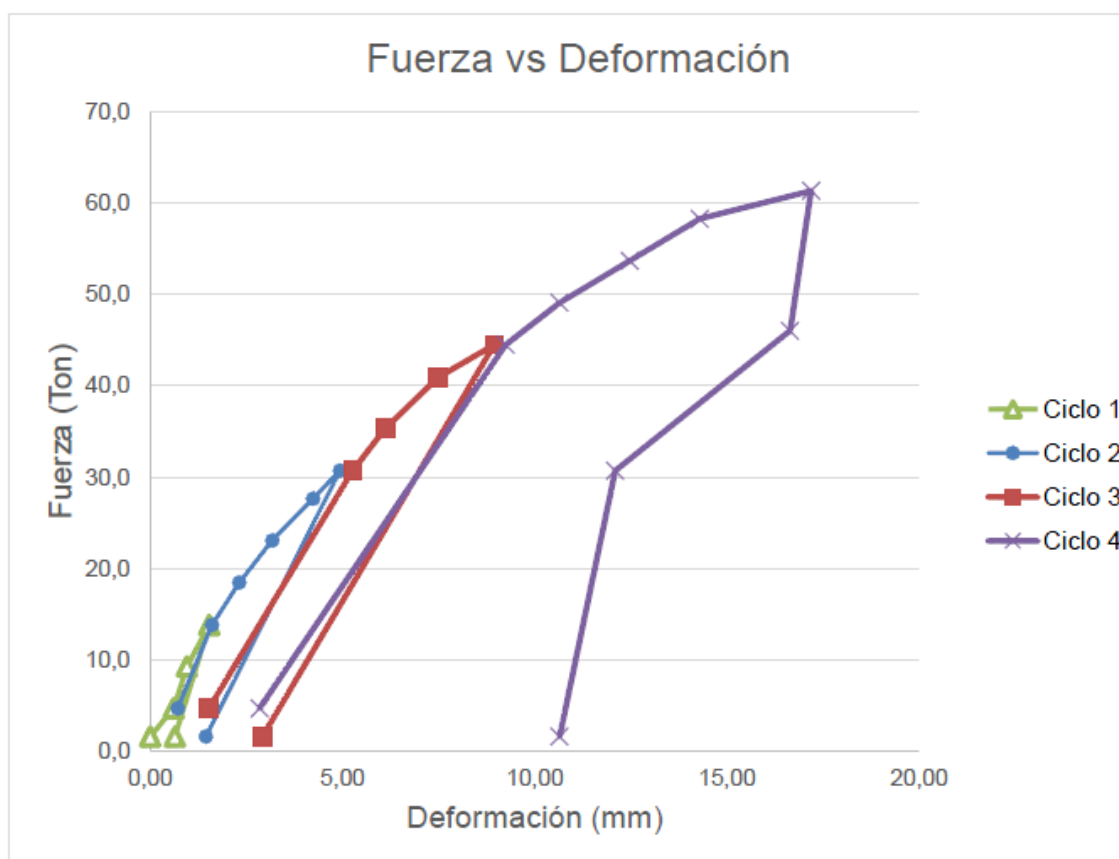


Ilustración 9 Grafica esfuerzo vs deformación

Figura 11. Curva esfuerzo vs deformación de ensayo objeto de esta investigación.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

Para dar cumplimiento al objetivo de esta investigación, se definieron tres metodologías de diseño, las cuales se consideran algunas de las más aceptadas y reconocidas a nivel mundial. Las metodologías seleccionadas son:

- (Bustamante & Doix, 1985) Considerada una de las primeras (sino la primera) referencias en cuanto al diseño de micropilotes, por tanto es el punto de partida de muchas metodologías.
- (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2005) Norma Española, la cual presenta dos métodos de diseño, uno racional y otro con base en tablas, destaca en esta metodología la inclusión de la influencia de la presión de inyección.
- (FHWA, Micropile Design and Construction, 2005) Guía de USA, la cual aparte del diseño geotécnico contiene apuntes sobre el diseño estructural, construcción y control en obra de micropilotes.

3.1. MÉTODO DE BUSTAMANTE & DOIX

Es el método de dimensionamiento más usado para calcular la resistencia al hundimiento para micropilotes, citado como (Bustamante & Doix, 1985). Dicha publicación es de reconocido prestigio y de amplia aceptación por la comunidad geotécnica y se basa en el empleo de correlaciones entre los índices SPT (N_{60}) y la adherencia límite q_s de la superficie y supone una recopilación de ensayos realizados a micropilotes en diferentes tipos de terreno con el objeto de determinar unas correlaciones empíricas que hasta la fecha han sido las más frecuentemente utilizadas. N_{60} corresponde al 60% de la energía usada en el ensayo SPT siguiendo la metodología de González, A (1999).

Es posible emplear correlaciones para estimar los parámetros de resistencia al corte de los materiales con base en el ensayo de campo de resistencia a la penetración estándar, el cual permite obtener el valor del N_{spt} . Para la presente investigación se usará la metodología propuesta por Álvaro González (1999) y en la Figura 12 se presentan las ecuaciones bases de dicha metodología.

Aunque el método para estimar la resistencia es representativo de suelos granulares, sirve como una primera aproximación a la resistencia del suelo fino. Se asume como válida la

hipótesis de energía de (Villafañe et al, 1997), además de la propuesta del ángulo de fricción de Kishida¹.

Se debe tener en cuenta que con este método de Bustamante sólo se define la capacidad geotécnica del elemento y no se relaciona la capacidad estructural.

Por energía (Villafañe et al, 1997) $n_1 = \sqrt[45]{70} \approx 0.64$	Por tipo de muestreador $n_3 = \begin{cases} 1.0 \text{ sin tubo interno} \\ 0.9 \text{ con tubo interno en arena suelta} \\ 0.8 \text{ con tubo interno en arena densa o arcila} \end{cases}$
Por longitud de la perforación $n_2 = \begin{cases} 0.75 \text{ si } 0 < L < 4 \\ 0.85 \text{ si } 4 < L < 6 \\ 0.95 \text{ si } 6 < L < 10 \\ 1.0 \text{ si } L \geq 10 \end{cases}$	Por diámetro de la perforación $n_4 = \begin{cases} 1.0 \text{ si } 60 \text{ mm} < D < 120 \text{ mm} \\ 1.05 \text{ si } 120 \text{ mm} < D < 150 \text{ mm} \\ 1.15 \text{ si } 150 \text{ mm} < D < 200 \text{ mm} \end{cases}$
$C_n (\text{Skempton}) = \frac{2}{1 + R_s}$	$R_s = \frac{\sigma'_v}{P_{atm}(100 \text{ kPa})}$
$N_{70} = N_{SPT} \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot C_n$	
$N_1 = N_{SPT} \cdot C_n$	
$N_{45} = N_{70} \cdot 70/45$	
$\phi_{eq} [^\circ] = \begin{cases} \phi_{JRB} = 15 + (9.375 \cdot N_{45})^{0.5} \rightarrow \text{Japan Road Bureau} \\ \phi_{Kishida} = 15 + (12.5 \cdot N_{45})^{0.5} \rightarrow \text{Kishida} \end{cases}$	
$\tau = \sigma' \cdot \tan \phi_{eq}$	

Figura 12. Ecuaciones básicas correlaciones c y ϕ del SPT. González, A (1999)

El procedimiento para obtener valores aproximados de resistencia efectiva c' y ϕ' con SPT es el siguiente, teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente:

- Obtener el valor de N (golpes/pie) en campo con la profundidad respectiva e identificar al tipo de suelo en el cual se hizo el ensayo.
- Colocar al ensayo la profundidad media entre las dos lecturas de golpes que se usen

¹ Tomada de González (1999)

- c) Obtener o estimar el valor del peso unitario total de la muestra, preferentemente en el sitio. Ésta se puede obtener de la muestra de la cuchara perdida, pero corrigiendo el área por la compresión que sufre la muestra al entrar al muestreador.
- d) Obtener lo más fiablemente posible la posición del nivel piezométrico
- e) Calcular el valor de los esfuerzos totales (σ), la presión de poros u_w y los esfuerzos efectivos ($\sigma' = \sigma - u_w$) para toda la columna de ensayo. Hay que tener en cuenta que el material puede estar saturado y la presión de poros puede ser negativa hasta la altura de capilaridad.
- f) El valor de N_{45} para Colombia se corrige por confinamiento con la formulación de C_n de Seed-Idriss (1970), teniendo cuidado que $C_n \leq 2$.
- g) Se obtiene el valor de ϕ_{eq}' con la fórmula de Kishida.
- h) Se calcula el valor de $\tau = \sigma' \times \tan(\phi_{eq}')$
- i) Se agrupan los valores de τ y σ'' por tipos de materiales
- j) Se hace la regresión τ vs σ' para cada tipo de material y se obtienen c' y $\tan\phi'$. Si en la regresión resulta $c' < 0$, se obliga a la regresión a pasar por cero.
- k) Se puede obtener el ϕ' mínimo de cada material haciendo $\phi' \text{ mínimo} = \phi_{eq}' \text{ mínimo}$
- k) Se colocan los resultados en un diagrama $c' - \tan\phi'$ y si son materiales del mismo origen geológico, los puntos normalmente se alinean en forma aproximada.

3.1.1. Recomendaciones

- Recomendaciones de presión de inyección (p_i)

$p_i \geq p_l$ método IRS (Inyección Repetitiva Selectiva)

$0.5p_l < p_i < p_l$ método IGU o tipo B (Inyección Global Unificada)

Donde, p_l es la presión límite del terreno.

- Recomendaciones para caudal de inyección (Q_i)

-0.3 a 0.6 m³/h (5 a 10 l/min) para suelos cohesivos

-0.8 a 1.2m³/h (13.3 a 20 l/min) para suelos friccionantes

3.1.2. Generalidades de dimensionamiento

Los siguientes elementos son importantes y se dimensionan porque son los más representativos del micropilote.

-Sección de refuerzo de acero S_a

-Longitud libre L_l

-Longitud de bulbo o sello L_s

En la Figura 13 se presenta el esquema básico presentado en Bustamante (1978).

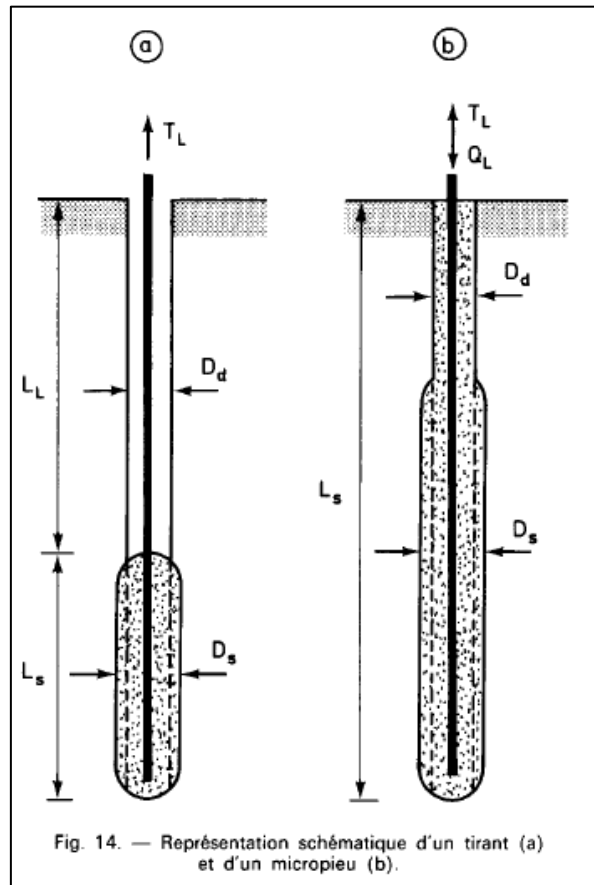


Fig. 14. — Représentation schématique d'un tirant (a) et d'un micropieu (b).

Figura 13. Esquema básico de micropilote. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

3.1.3. Cálculo de capacidad a compresión de un micropilote

Se tiene la fórmula básica:

$$Q_L = Q_L^P + Q_L^s$$

Donde,

Q_L : Carga límite del micropilote

Q_L^P : Resistencia de límite por punta

Q_L^s : Fricción límite del bulbo o sello

Se tiene como consideración que $Q_L^s = T_L$

Así

$$T_L = \pi D_s L_s q_s$$

Donde,

T_L : Tracción límite del micropilote

D_s : Diámetro con el bulbo

q_s : Resistencia por fricción lateral generada a lo largo de la pared del bulbo

El valor de D_s , depende del diámetro de la perforación D_d , del método de inyección y tipo de suelo. Se ha adoptado el factor α que contiene esta información así:

$$D_s = \alpha D_d$$

Los valores de q_s , depende de la naturaleza del suelo, grado de compactación o compacidad y tipo de inyección. En la Tabla 8 se presentan los valores típicos de α para diferentes materiales.

Tabla 8. Valores de α Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

SOLS	Coeficiente α		Quantité de coulis conseillée V_i
	IRS*	IGU**	
Grave	1,8	1,3 à 1,4	$1,5V_s^*$
Grave sableuse	1,6 à 1,8	1,2 à 1,4	$1,5V_s$
Sable graveleux	1,5 à 1,6	1,2 à 1,3	$1,5V_s$
Sable grossier	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	$1,5V_s$
Sable moyen	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	$1,5V_s$
Sable fin	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	$1,5V_s$
Sable limoneux	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	1,5 à 2 V_s pour IRS 1,5 V_s pour IGU
Limon	1,4 à 1,6	1,1 à 1,2	2 V_s pour IRS 1,5 V_s pour IGU
Argile	1,8 à 2	1,2	2,5 à 3 V_s pour IRS 1,5 à 2 V_s pour IGU
Mame	1,8	1,1 à 1,2	1,5 à 2 V_s pour couche compacte
Mamo - calcaire	1,8	1,1 à 1,2	
Craie altérée ou fragmenté	1,8	1,1 à 1,2	2 à 6 V_s ou plus, si couche fracturée
Rocher altéré ou fragmenté	1,8	1,1 à 1,2	1,1 à 1,5 V_s si couche finement fissurée 2 ou plus si couche fracturée
$V_s = \text{volume dy bulbe de scellement}$		* : avec $p_i \geq p_j$	
IRS = injection répétitive et sélective		** : avec $0,5p_j < p_i < p_j$	
IGU = injection globale en press unifrée			

En la Figura 14, Figura 15 y Figura 16 se presentan los ábacos para cálculo de q_s , según el tipo de suelo.

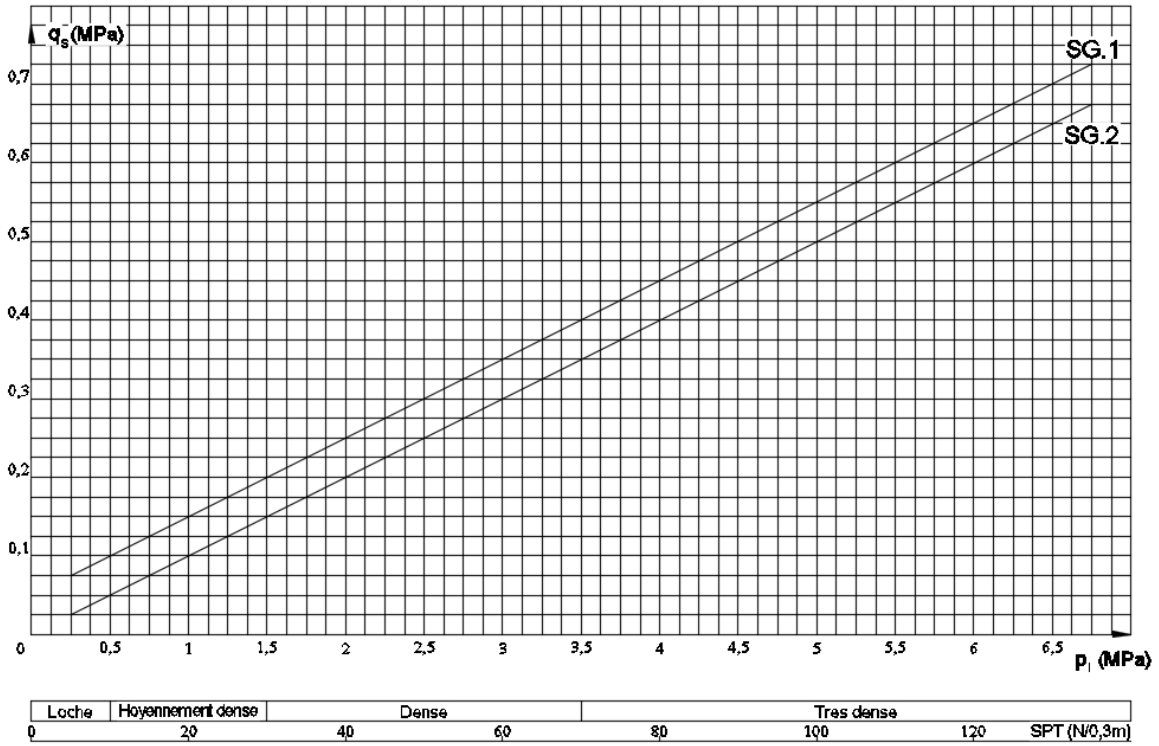


Figura 14. Ábaco el cálculo de q_s para gravas. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

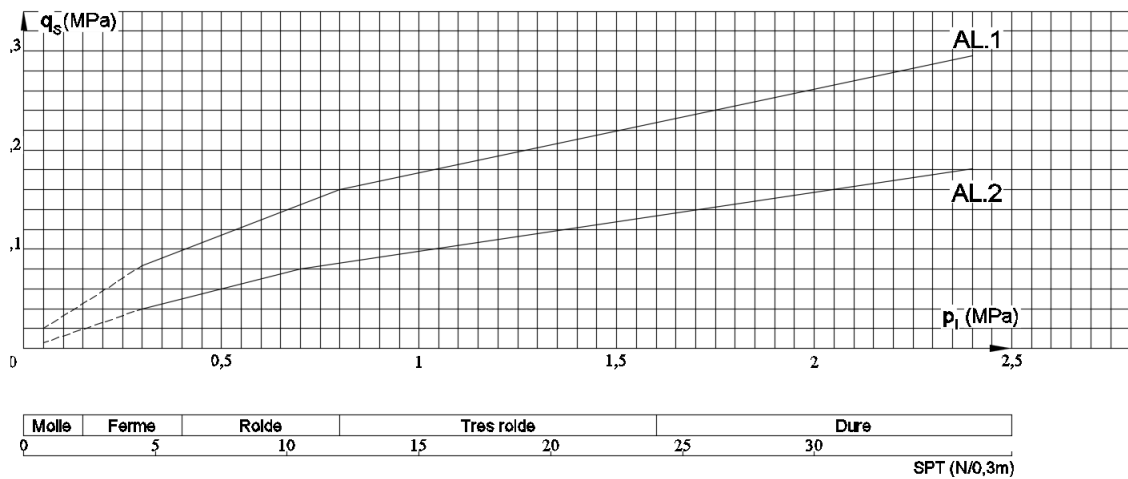


Figura 15. Ábaco el cálculo de q_s para arcillas y limos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

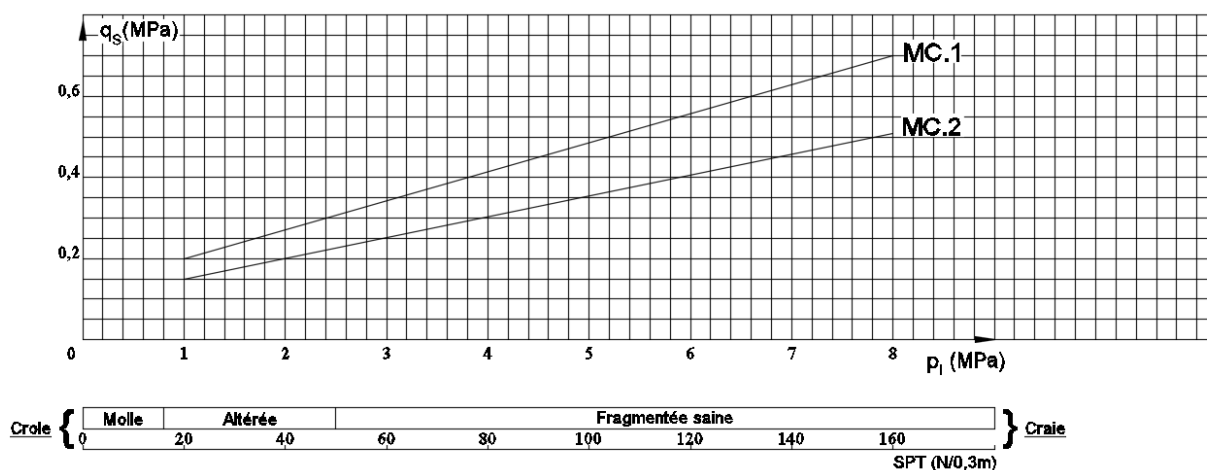


Figura 16. Ábaco el cálculo de q_s para materiales calcáreos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

Se debe tener en cuenta la Tabla 9 para usar los ábacos mostrados anteriormente

Tabla 9. Selección de curvas en ábacos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

SOLS	Mode d'injection	
	IRS*	IGU**
Grave Grave sableuse Sable graveleux Sable grossier Sable moyen Sable fin Sable limoneux	SG.1	SG.2
Limo Argile	AL.1	AL.2
Marne Marne-calcaire Craie altéré ou fragmenté	MC.1	MC.2
Rocher altéré ou fragmenté	$\geq R.1$	$\geq R.2$
* : avec $p_i \geq p_l$ ** : avec $0,5 p_l < p_i < p_l$		

Cuando la longitud del bulbo pasa por varias capas (i), se debe hacer:

$$T_L = \sum_i \pi D_{si} L_{si} q_{si}$$

Tal como se muestra en la Figura 17.

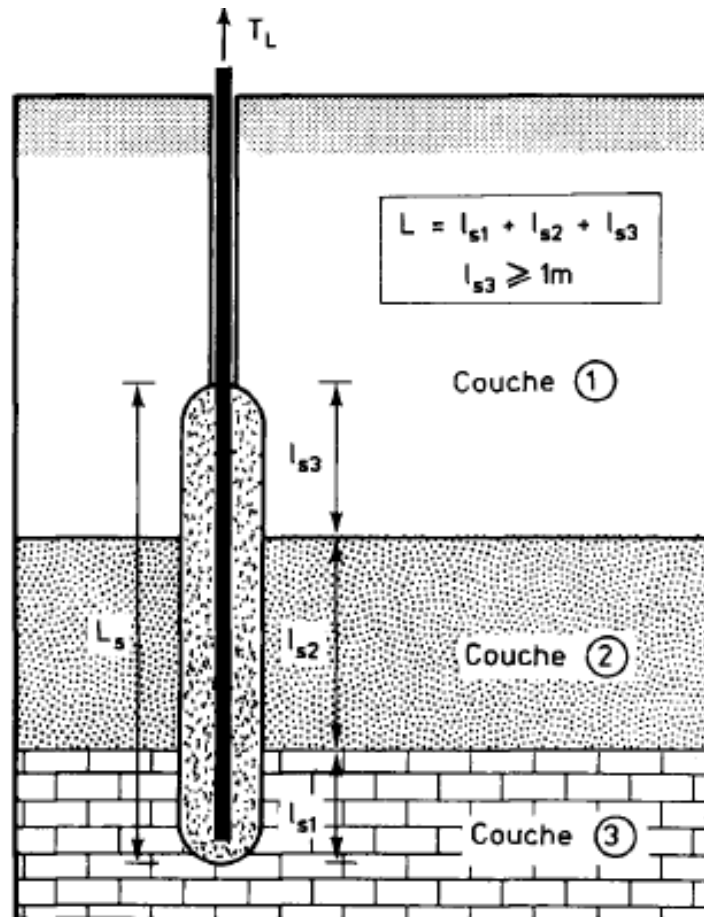


Figura 17. Esquema cuando el bulbo se pasa por varios estratos. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

Para el valor de Q_L^p , en general se admite que:

$$Q_L^p = 0.15Q_L^s$$

Con lo cual quedan definidos todos los términos del método.

3.1.4. Factores de seguridad

En la Tabla 10 se presentan los factores de seguridad recomendados.

Tabla 10. Factores de seguridad recomendados. Bustamante, M., & Doix, B. (1985).

Type de fondation injectée	Durée d'utilisation	Valeur du coefficient de sécurité F_s suivant le mode de sollicitation	
		arrachement	compression
Tirant	provisoire	1,8	—
	permanent	2,0	—
Micropieu	provisoire	2,0	1,8
	permanent	2,0	2,0

3.2. GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA (GUÍA ESPAÑOLA)

Para el cálculo de capacidad portante de micropilotes según (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2005), usando esta metodología, se requiere conocer los esfuerzos actuantes, transmitidos de la estructura a cimentar o recalzar o el macizo de terreno a estabilizar, etc.

Con carácter general, deberán efectuarse las siguientes comprobaciones:

-Estados límites últimos:

- Falla de estabilidad global
- Falla de capacidad de soporte de terreno
- Falla estructural
- Socavación de cimiento

-Estados límites de servicio

Sin embargo, para efectos del presente documento y la aplicación de micropilotes como estructuras de cimentación ante esfuerzos de compresión, se centra en la falla por hundimiento o capacidad de carga.

3.2.1. Comprobación frente a hundimiento

El valor de la resistencia deberá ser mayor o igual que el esfuerzo axial (compresión) transmitido por la estructura en la hipótesis más desfavorable, es decir:

$$R_{c,d} \geq N_{c,Ed}$$

Donde,

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo a compresión.

$N_{c,Ed}$: Esfuerzo axial, obtenido a partir de cargas mayoradas.

La resistencia será la suma de las resistencias por punta y fuste en su caso, las cuales dependen tanto de las características del micropilote, como del terreno y entorno.

3.2.1.1. Comprobación frente al hundimiento en suelos

Para poder considerar la resistencia por punta, se debe verificar la influencia de la misma:

- En terrenos friccionantes, que el valor de N corregido al 60% de la energía del ensayo SPT sea mayor a 30 ($N_{60} \geq 30$), es decir compacidad densa a muy densa.
- En terrenos cohesivos, cuando la resistencia a la compresión simple sea superior a 100 kPa, es decir $q_u > 100$ kPa.
- La longitud de empotramiento en el terreno de las características referidas, debe ser superior o igual a seis diámetros nominales ($L_{emp} \geq 6D$), medidos sobre el plano de la punta.

Según lo anterior, se tienen dos casos, cuando se puede considerar la resistencia por punta y cuando no.

- a) Cuando no se puede considerar la resistencia por punta

Habrà de tenerse en cuenta s3lo la resistencia por fuste

$$R_{c,d} = R_{fc,d} = A_L r_{fc,d}$$

Donde,

$R_{c,d}$: Resistencia de c3lculo a compresi3n.

$R_{fc,d}$: Resistencia por fuste

A_L : 3rea lateral del micropilote

$r_{fc,d}$: Rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de compresi3n

Quando se tengan terrenos estratificados de diferentes caracter3sticas, se deber3 discretizar y aplicar la expresi3n:

$$R_{fc,d} = \sum_{i=0}^n A_{Li} (r_{fc,d})_i$$

- b) Cuando pueda considerarse la resistencia por punta

$$R_{c,d} = R_{p,d} + R_{fc,d}$$

Donde,

$R_{c,d}$: Resistencia de c3lculo a compresi3n.

$R_{fc,d}$: Resistencia por fuste

$R_{p,d}$: Resistencia por punta

3.2.1.2. Comprobación frente al hundimiento en roca

Para poder considerar roca, es necesario que en la zona de la punta se cumpla simultáneamente:

- La roca presente una meteorización inferior o igual a III según ISRM, el índice RQD sea superior al 60% y la resistencia a la compresión simple sea superior a 20 MPa.
- La longitud de empotramiento en el terreno de las características referidas, debe ser superior o igual a seis diámetros nominales ($L_{emp} \geq 6D$), medidos sobre el plano de la punta.

En tales circunstancias, se tiene que:

$$R_{c,d} = R_{e,d}$$

Donde,

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo a compresión.

$R_{fc,d}$: Resistencia de cálculo en el empotramiento en roca

En caso de no cumplir, se analizará como un micropilote en suelo.

3.2.2. Resistencia teórica por fuste

Este valor puede ser obtenido a partir del rozamiento con el terreno, sin embargo se anota que en caso que el micropilote atraviese cavidades deberá considerarse nula la resistencia por fuste en el tramo en cuestión, también en los tramos que, por cualquier circunstancia, se deje una tubería de revestimiento (camisa perdida), salvo justificación del proyecto.

El rozamiento unitario puede obtenerse como:

$$r_{fc,d}(z) = \frac{c'}{F_c} + \sigma'_H(z) * \frac{\tan\delta}{F_\phi}$$

Donde,

z : Profundidad, medida verticalmente

c' : Cohesión efectiva. En general, salvo que se tenga certeza conviene reducirla

δ : Ángulo de rozamiento terreno – fuste del micropilote. Resulta habitual considerar que $\delta = k_r * \varphi'$. Donde normalmente ($2/3 \leq k_r \leq 1$).

$\sigma'_H(z)$: Presión horizontal efectiva a la profundidad z. Se determina dependiendo del tipo de inyección:

Inyecciones tipo IRS:

$$\sigma'_H(z) = k_0 \sigma'_V(z) + \frac{p_i}{3}$$

-Resto de casos:

$$\sigma'_H(z) = k_0 \sigma'_V(z)$$

Donde,

$\sigma'_V(z)$: Presión vertical efectiva a la profundidad z

p_i : Presión de inyección, solo se considera en sistema IRS cuando la zona de fuste se encuentra a una profundidad mayor a 5.0 m.

k_0 : Coeficiente de empuje al reposo.

En la Tabla 11 se presentan los coeficientes o factores de reducción de ángulo de rozamiento y cohesión.

Tabla 11. Coeficientes F_c y F_φ . Tabla 3.1 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera

TIPO DE APLICACIÓN	F_c	F_φ
Estructuras de cimentación de nueva construcción	1,50	1,50
Recalce de estructuras de cimentación preexistentes	1,20	1,20

3.2.2.1. Situaciones de corto plazo

En geotecnia es relativamente frecuente examinar un tipo de situación específica denominada de «corto plazo» en la que se supone que el terreno tiene un exceso de presiones intersticiales

que fue generado por las cargas aplicadas y que aún no se ha disipado. Normalmente, la duración de esa situación es corta cuando se compara con la vida útil de la obra y en consecuencia, a efectos de evaluar la seguridad, puede considerarse como una situación transitoria.²

Para el caso cuyo fuste esté en contacto con suelos arcillosos saturados y para el análisis de corto plazo, el rozamiento unitario se obtendrá cómo:

$$r_{fc,d} = \frac{s_u}{F_{cu}}$$

Donde,

s_u : Resistencia al corte no drenada a la profundidad z .

F_{cu} : Coeficiente de minoración igual a 0.90.

3.2.2.2. Correlaciones empíricas

La resistencia por fuste se puede obtener mediante la expresión:

$$r_{fc,d} = \frac{r_{f,lim}}{F_r}$$

Donde,

$r_{f,lim}$: Rozamiento límite por fuste. Puede obtenerse de la Figura 18, siempre que se cumplan los criterios.

F_r : Coeficiente de minoración. Puede obtenerse de la Tabla 12.

²Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras. (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. España, 2.8.

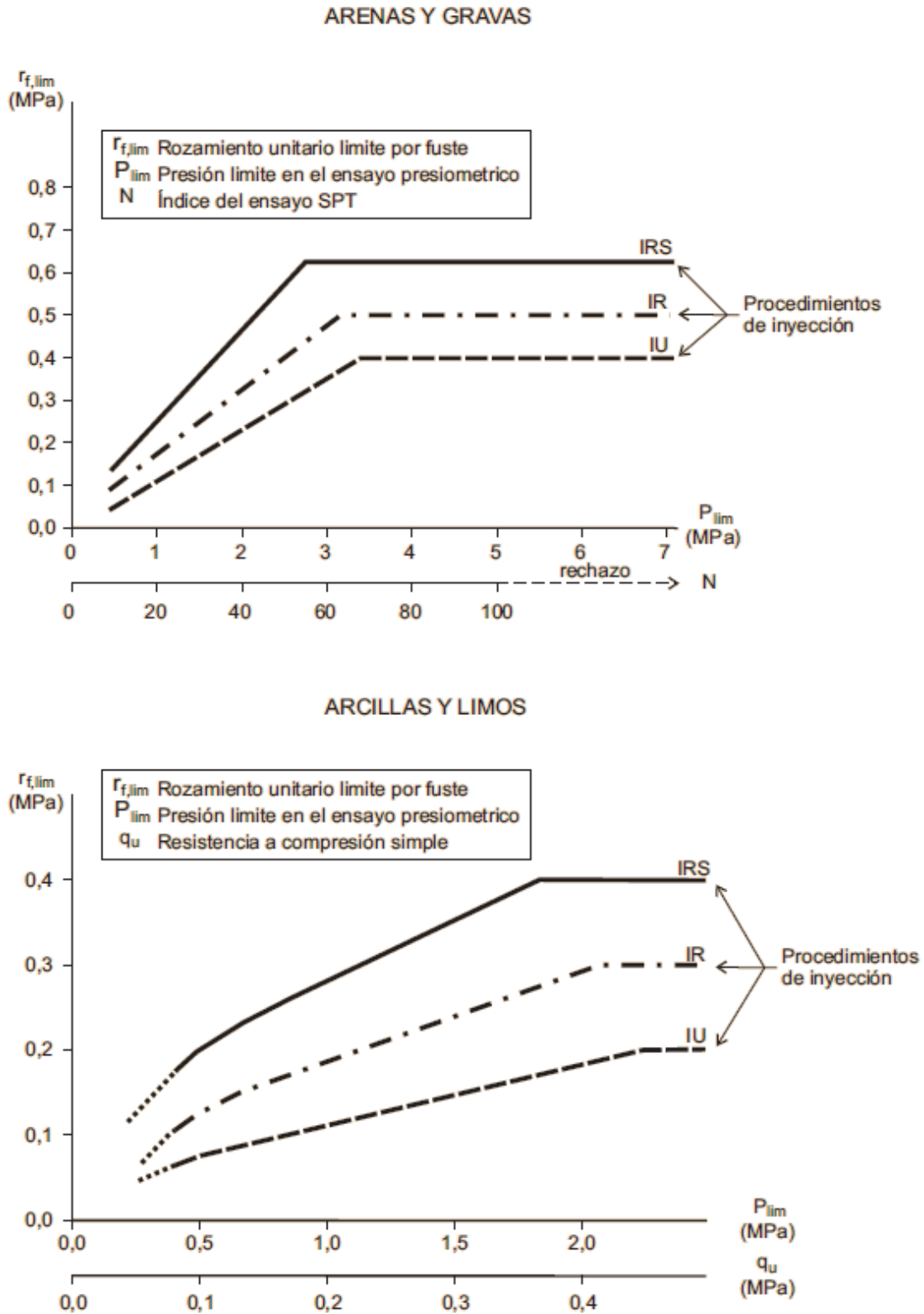


Figura 18. Rozamiento unitario límite. Figura 3.3 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera

Cabe recordar que, para una profundidad menor a 5 m, en todo caso, el valor del rozamiento límite corresponde al de una inyección tipo IGU (IU).

Tabla 12. Coeficiente F_r . Tabla 3.2 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera

DURACIÓN	F_r
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración inferior o igual a seis (6) meses	1,45
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración superior a seis (6) meses	1,65

3.2.3. Resistencia por punta

3.2.3.1. Resistencia por punta en suelos

Aunque por su pequeña sección transversal suele omitirse este valor, cuando pueda tenerse en cuenta, habrá de adoptarse como valor máximo, el quince por ciento (15%) de la resistencia por fuste. Es decir,

$$R_{p,d} \leq 0.15R_{f,c,d}$$

3.2.4. Resistencia por empotramiento en roca

Cuando pueda considerarse, se obtendrá mediante:

$$R_{e,d} = A_{Le}f_{e,d} + A_{Pe}q_{pe,d}$$

Donde,

A_{Le} : Área lateral del micropilote enterrado en roca

$f_{e,d}$: Resistencia unitaria por fuste en el empotramiento en roca

A_{Pe} : Área transversal empotrada en roca

$q_{pe,d}$: Resistencia unitaria por punta

Los parámetros $f_{e,d}$ y $q_{pe,d}$ pueden tomarse de la Tabla 13.

Tabla 13. Resistencia unitaria de cálculo en el empotramiento en Roca (Grado ISRM ≤ 3).

Tabla 3.2 Capítulo 3. Cálculo de cimentaciones. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera

TIPO DE ROCA	$f_{e,d}$ (MPa)	$q_{pe,d}$
Margas y margocalizas	0,15 - 0,40	$0,07 \cdot q_u$
Pizarras y otros esquistos	0,20 - 0,30	$0,07 \cdot q_u$
Areniscas	0,30 - 0,45	$0,07 \cdot q_u$
Calizas y dolomías	0,40 - 0,50	$0,10 \cdot q_u$
Granitos y basaltos	0,40 - 0,60	$0,10 \cdot q_u$

3.2.5. Cálculo de asentamientos

En el cálculo de asentamientos en cimentaciones nuevas o recalces, en que los elementos atraviesen suelos granulares y cohesivos, el trabajo principal corresponde a los niveles menos deformables, que son los primeros en entrar en carga de modo significativo. Por tanto, se recomienda tener en cuenta únicamente los suelos cohesivos de consistencia muy firme a dura ($q_u > 0.35$ MPa) y los granulares de compacidad media a muy densa ($N > 20$).

Cuando ninguno de los dos sea claramente más deformable que el otro, en ausencia de modelos numéricos más precisos, podrá calcularse considerando que todo el terreno atravesado fuese granular y otro cohesivo. El asentamiento total, se estimará como la media ponderada de dichos cálculos.

3.2.5.1. Roca

Cuando se tenga una situación de empotramiento en roca, el asentamiento corresponderá aproximadamente al acortamiento elástico del micropilote

$$S_e = \frac{N_{c,EK} L_E}{A_p E_p}$$

Donde,

S_e : Asentamiento elástico

$N_{c,EK}$: Fuerza axial sin mayorar

L_E : Longitud del micropilote que se acorta elásticamente. Es igual a la longitud total menos la longitud empotrada en roca. $L_E = L - L_{emp}$.

$A_p E_p$: Rigidez de la sección transversal del micropilote. Equivale a la suma de las rigideces de la lechada o mortero y de la armadura. Es decir:

$$A_p E_p = A_c E_c + (A_{pr} + A_s) E_s$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del mortero

A_c : Sección neta de lechada o mortero, descontando la armadura

E_s : Módulo de elasticidad del acero

A_s : Sección total de las barras de acero

A_{pr} : Sección reducida de la armadura tubular de acero, calculada teniendo en cuenta la reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión.

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2]$$

Siendo:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular

r_e : Reducción de armadura por efecto de corrosión, según la Tabla 14

d_i : Diámetro interior de la armadura tubular.

Tabla 14. Reducción de espesor de armadura por efecto de corrosión. Tabla 2.4 Capítulo 2. Materiales y productos. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera

TIPO DE TERRENO	VIDA ÚTIL REQUERIDA AL MICROPILOTE ³ (años)				
	5	25	50	75	100
Suelos naturales sin alterar	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Suelos naturales contaminados o suelos industriales	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Suelos naturales agresivos (turberas, ciénagas, etc.)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Rellenos no agresivos sin compactar ²	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Rellenos agresivos sin compactar (cenizas, escorias, etc.) ²	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

¹ Según UNE EN 14199.

² La corrosión es menor en rellenos compactados que en rellenos sin compactar; así, en los compactados, los valores reflejados en esta tabla pueden reducirse hasta la mitad.

³ Los valores dados para 5 y 25 años se basan en mediciones reales, mientras que en los demás casos se han obtenido como resultado de extrapolaciones.

3.2.5.2. Suelos granulares

Se puede emplear la siguiente expresión:

$$S_N = \left(\frac{9N_{c,EK}}{R_{c,d}} - 2 \right) \frac{D}{90}$$

Donde,

$N_{c,EK}$: Esfuerzo axial, considerando las acciones sin mayorar

$R_{c,d}$: Resistencia frente al hundimiento

D : Diámetro nominal del micropilote

Cuando se reúnan las condiciones para considerar la resistencia por punta, deberá considerarse el acortamiento elástico, así mismo debido a capas blandas S_b , situadas por debajo de la punta del micropilote. Es decir:

$$S_T = S_N + S_e + S_b$$

3.2.5.3. Suelos cohesivos

Se puede emplear la siguiente expresión:

$$S_N = \frac{0.6N_{c,Ek}}{Lq_c}$$

Donde,

$N_{c,Ek}$: Esfuerzo axial

L : Longitud del micropilote

q_c : Resistencia unitaria a la penetración estática, calculada preferiblemente con el cono CPT, en su defecto deberá correlacionarse con la resistencia al corte no drenado.

Así mismo, cuando se den las condiciones deberá calcularse un asentamiento total como:

$$S_T = S_N + S_e + S_b$$

3.2.6. Grupos de micropilotes

En los numerales anteriores, se hace referencia a micropilotes aislados, sin embargo, raramente se encuentran cimentaciones que se apoyen sobre un solo micropilote.

Se llama grupo de micropilotes, a un grupo de micropilotes verticales, al que se le pueden añadir, en ciertos casos, algunos micropilotes inclinados, unidos en cabeza por un mismo encepado.

3.2.6.1. Carga vertical

Se define el coeficiente de eficiencia bajo carga vertical

$$C_e = \frac{R_{cg,d}}{nR_{c,d}}$$

Donde,

C_e : Coeficiente de eficiencia de grupo

$R_{cg,d}$: Resistencia frente a hundimiento, del grupo de micropilotes

n : Número de micropilotes que forman el grupo

En arenas, el efecto parece ser óptimo para valores de espaciamiento ($2.5 \leq S/D \leq 4$). Para valores inferiores de S , el confinamiento puede provocar una rotura en bloque del conjunto. Para valores superiores de S el confinamiento se reduce y la resistencia tiende a la del micropilote individual $C_e = 1$.

S : Separación entre ejes de micropilotes

D : Diámetro nominal del micropilote

Cuando se tienen grupos pequeños, se produce una disminución de la eficiencia $C_e < 1$.

En general, se observa que la capacidad resistente de un grupo aumenta, si los micropilotes centrales se ejecutan en último lugar.

3.2.6.2. Asentamiento de un grupo micropilotes

Se distinguen dos tipos de efectos:

-Los efectos debidos a la puesta en obra, que modifican las propiedades del suelo en masa y de las interfaces micropilotes-terreno.

-Efecto de las interacciones mecánicas entre los micropilotes (superposición de efectos de desplazamientos).³

³ Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras. (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. España. Capítulo 5

3.3. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA)

La filosofía de diseño de un micropilote, según FHWA (2005) no difiere mucho del de una pila hincada. Sin embargo, para el diseño de pilas estructuralmente se tienen grandes secciones transversales, lo que resulta en alta rigidez y capacidad estructural, por tanto, generalmente el diseño es dominado por la capacidad geotécnica. Para los micropilotes, que tienen pequeñas secciones, los diseños habitualmente son controlados por la capacidad estructural, de ahí que muchos de estos sistemas se diseñen con barras especiales. Además, los sistemas de inyección a altas presiones, proporcionan un aumento en la resistencia por fuste, aumentando más su capacidad geotécnica.

En la Figura 19 se presenta un esquema general de un micropilote.

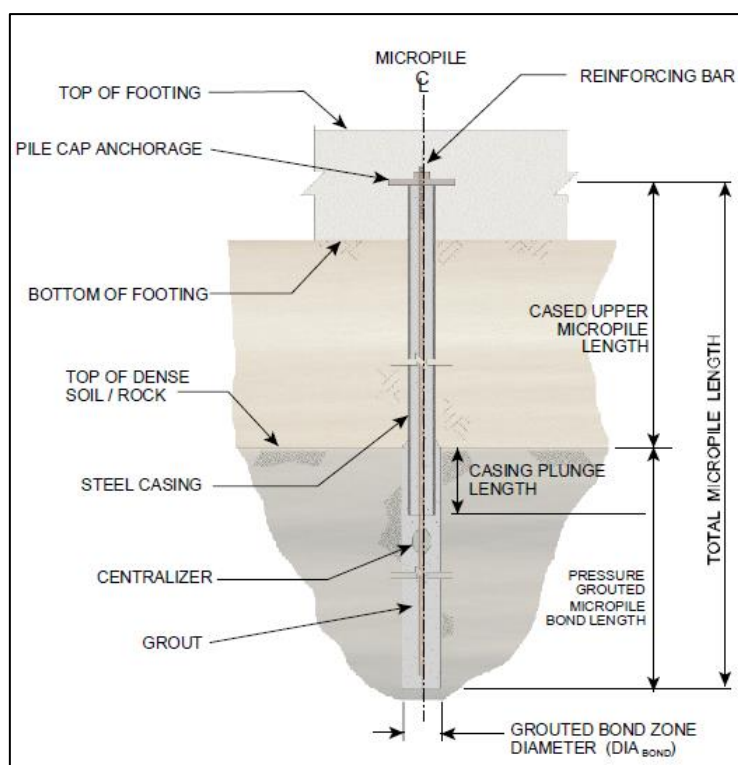


Figura 19. Esquema general de un micropilote. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

3.3.1. Diseño preliminar

En la Tabla 15 se presenta un resumen de los pasos básicos de diseño.

Tabla 15. Pasos básicos de diseño, según FHWA. Table 5-1. Design Steps for Micropiles used for Structural Foundations. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

1.	Identify project requirements and evaluate micropile feasibility
2.	Review available information and perform subsurface exploration and laboratory testing program
3.	Develop all loading combinations
4.	Preliminary design of micropiles
	- spacing
	- length
	- cross section
5.	Evaluate allowable structural capacity of cased length
6.	Evaluate allowable structural capacity of uncased length
7.	Compare design loads to structural capacity from Steps 5 and 6 and modify structural section, if necessary
8.	Evaluate geotechnical capacity of micropile
	- evaluate suitable ground stratum for bond zone
	- select bond stress and calculate bond length required to resist design load
	- evaluate micropile group capacity for compression and tension (i.e., uplift)
9.	Estimate micropile group settlement
10.	Design micropile to footing connection at pile cap
11.	Develop load testing program
12.	Prepare Drawings and Specifications
Other Design Considerations	
1.	Corrosion Protection **
2.	Plunge Length
3.	End Bearing Micropiles
4.	Downdrag
5.	Lateral Loads on Single Vertical Micropiles
6.	Lateral Loads on Micropiles Groups
7.	Bucking
8.	Seismic
** Corrosion protection is a critical component of all micropile designs	

3.3.1.1. Espaciamiento

En todos los casos, el espaciamiento individual debe ser por lo menos 760 mm o por lo menos 3 diámetros de micropilote, lo que sea mayor. Este criterio, se debe a posibles desviaciones en la vertical de los elementos y reducir el efecto de grupo por pilotes adyacentes. Se debe considerar también, el uso de pocos micropilotes de alta capacidad o un número mayor de elementos de baja capacidad.

3.3.1.2. Longitud

La longitud total dependerá de la capacidad geotécnica que pueda desarrollar el micropilote. Típicamente, la longitud total se restringe a un valor cercano a 30 m.

3.3.1.3. Sección

Para soportar cargas axiales, el revestimiento exterior suele ser de acero con tamaños de diámetro exterior entre 141 mm (5^{1/2}") y 248 mm (9^{5/8}") con una resistencia de 552 MPa.

En general, se tienen mejores resultados usando micropilotes con carcasa/tubería exterior, que sólo la barra de refuerzo, ya que son mejores para soportar cargas axiales y laterales con menores deformaciones, reduciendo los costos de excavación.

En la mayoría de los casos, la resistencia bulbo – acero no gobierna el diseño, en general, es controlado por la resistencia estructural de la sección transversal.

3.3.1.4. Tipo

Dependerá de las características propias del proyecto y equipo disponible.

3.3.2. Diseño estructural longitud de tubería

$$P_{c-allowable} = [0.4f'_{c-grout}x A_{grout} + 0.47F_{y-stell}(A_{bar} + A_{casing})]$$

Donde,

$P_{c-allowable}$: Carga de compresión admisible

$f'_{c-grout}$: Resistencia compresión de la lechada a 28 días

A_{grout} : Área de lechada en la sección (sólo interna)

$F_{y-stell}$: Tensión de fluencia del acero

A_{bar} : Área de la barra

A_{casing} : Área de la carcasa/casing.

En la ecuación anterior se debe usar la mínima resistencia del acero de los componentes utilizados. Por ejemplo para hacer compatibles las deformaciones, teniendo en cuenta que la deformación máxima usable del concreto es 0.003 cm, para un E de acero típico de 200.000 MPa, daría una esfuerzo admisible de 600 MPa.

Se anota, que no se incluye una reducción por corrosión, por tanto, se debe usar una adecuada protección en función de los materiales circundantes.

3.3.3. Diseño estructural de la longitud sin tubería

La resistencia a la compresión está dada por:

$$P_{c-allowable} = (0.4f'_{c-grout} \times A_{grout} + 0.47F_{y-stell} A_{bar})$$

3.3.4. Revisión de diseño

Una vez hechas las revisiones para las diferentes condiciones de carga, se deberán ajustar las áreas de las barras, resistencias, longitudes de tubería y número de elementos, para satisfacer las condiciones

3.3.5. Evaluación de capacidad geotécnica del micropilote

3.3.5.1. Establecer un estrato para la zona de bulbo

Las máximas cargas aplicadas en la cabeza del micropilote, deben ser resistidas por la resistencia desarrollada en la interfaz bulbo – suelo sobre una longitud específica del micropilote. Esta longitud, se refiere como longitud de bulbo. El objetivo para diseño es evaluar la longitud óptima requerida para resistir las cargas aplicadas. Esta longitud se afecta con un factor de seguridad.

Al igual que los anclajes, ciertos tipos de suelos generalmente no tienen condiciones para la zona de bulbo, incluyendo: suelos orgánicos, suelos cohesivos con índice de liquidez mayor a 0.2, suelos cohesivos con límite líquido medio mayor a 50. Si son usadas, es recomendado aumentar los factores de seguridad.

3.3.5.2. Seleccionar el esfuerzo último del bulbo y su longitud

La capacidad admisible del bulbo, se calcula como:

$$P_{G-allowable} = \frac{\alpha_{bond}}{FS} \times \pi \times D_b \times L_b$$

Donde,

α_{bond} : Resistencia última lechada – suelo

FS : Factor de seguridad aplicado a la resistencia de bulbo

D_b : Diámetro de perforación

L_b : Longitud de bulbo

En mayoría de los casos, la ecuación anterior se reorganiza:

$$L_b = \frac{P_{G-allowable} \times FS}{\alpha_{bond} \times \pi \times D_b}$$

Donde la carga, será igual a la máxima carga para diseño.

En la Tabla 16 y Tabla 17 se da una guía de valores para la resistencia última lechada suelo, según tipo de micropilote y suelo.

Para muchos proyectos, se deben elegir los valores mínimos en materiales granulares suelos o materiales cohesivos de alta plasticidad. Sin importar el tipo de micropilote a construir, el diseñador debe asumir Tipo A para micropilotes con zona de bulbo en roca y Tipo B para micropilotes con zona de bulbo en suelo.

Tabla 16. Resumen de resistencias suelo-lechada para diseño. Table 5-3. Summary of Typical abond (Grout-to-Ground Bond) Values for Micropile Design. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

Soil / Rock Description	Grout-to-Ground Bond Ultimate Strengths, kPa (psi)			
	Type A	Type B	Type C	Type D
Silt & Clay (some sand) (soft, medium plastic)	35-70 (5-10)	35-95 (5-14)	50-120 (5-17.5)	50-145 (5-21)
Silt & Clay (some sand) (stiff, dense to very dense)	50-120 (5-17.5)	70-190 (10-27.5)	95-190 (14-27.5)	95-190 (14-27.5)
Sand (some silt) (fine, loose-medium dense)	70-145 (10-21)	70-190 (10-27.5)	95-190 (14-27.5)	95-240 (14-35)
Sand (some silt, gravel) (fine-coarse, med.-very dense)	95-215 (14-31)	120-360 (17.5-52)	145-360 (21-52)	145-385 (21-56)
Gravel (some sand) (medium-very dense)	95-265 (14-38.5)	120-360 (17.5-52)	145-360 (21-52)	145-385 (21-56)
Glacial Till (silt, sand, gravel) (medium-very dense, cemented)	95-190 (14-27.5)	95-310 (14-45)	120-310 (17.5-45)	120-335 (17.5-48.5)
Soft Shales (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	205-550 (30-80)	N/A	N/A	N/A
Slates and Hard Shales (fresh- moderate fracturing, little to no weathering)	515-1,380 (75-200)	N/A	N/A	N/A
Limestone (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	1,035-2,070 (150-300)	N/A	N/A	N/A
Sandstone (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	520-1,725 (75.5-250)	N/A	N/A	N/A
Granite and Basalt (fresh- moderate fracturing, little to no weathering)	1,380-4,200 (200-609)	N/A	N/A	N/A

Type A: Gravity grout only

Type B: Pressure grouted through the casing during casing withdrawal

Type C: Primary grout placed under gravity head, then one phase of secondary "global" pressure grouting

Type D: Primary grout placed under gravity head, then one or more phases of secondary "global" pressure grouting

Tabla 17. Resumen de valores típicos de AB (enlace Lechada a Tierra) para el diseño de micropilote preliminar (modificado después de Sabatini, et al., 2005). Norma Colombiana de diseño de Puentes CCP-14

Descripción Suelo/Roca	Rango típico de Grout-to-Grout Bond Nominal Resistance para tipos de micropilotes (Mpa)				
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Limo y arcilla (un poco de arena) (plástico medio suave)	0.035-0.07	0.035-0.1	0.035-0.1	0.035-0.125	0.035-0.1
Limo y arcilla (un poco de arena) (rígida, densa a muy densa)	0.035-0.125	0.07-0.2	0.1-0.2	0.1-0.2	0.0070-0.2
Arena (algún limo) (fina, suelta medio densa)	0.0070-0.15	0.0070-0.2	0.1-0.2	0.1-0.250	0.070-0.25
Arena (algún limo, grava) (fino-grueso, medio muy denso)	0.1-0.225	0.125-0.375	0.15-0.375	0.150-0.4	0.125-0.375
Grava (un poco de arena) (mediana a muy densa)	0.1-0.275	0.125-0.375	0.15-0.375	0.15-0.4	0.125-0.375
Caja glacial (limo arena, grava) (mediana a muy densa, cementada)	0.1-0.2	0.1-0.325	0.125-0.325	0.125-0.35	0.1-0.325
Las Lutitas blandas (fractura fresca o moderada, poco o nada de desgaste)	0.215-0.575	N/A	N/A	N/A	N/A
Las pizarras y esquistos duros (fractura fresca o moderada, poco o nada de desgaste)	0.54-1.44	N/A	N/A	N/A	N/A
Piedra caliza (fractura fresca o moderada, poco o nada de desgaste)	1.08-2.16	N/A	N/A	N/A	N/A
Arenisca (fractura fresca o moderada, poco o nada de desgaste)	0.54-1.8	N/A	N/A	N/A	N/A
El granito y basalto (fractura fresca o moderada, poco o nada de desgaste)	1.44-4.385	N/A	N/A	N/A	N/A

La elección del factor de seguridad, depende de varias condiciones, se tienen las siguientes recomendaciones

- FS=2.0

Al menos una prueba de carga es ejecutada antes de la construcción de los micropilotes, en cada tipo de suelo elegido como estrato para la zona de bulbo.

Durante la instalación final, se deben probar/verificar por lo menos el 5 % de los micropilotes construidos.

- FS=2.5

Cuando se instalen en suelos con potencial de creep, alta plasticidad, roca suave, o cualquier suelo considerado no apto. Para estos suelos, la medición de deformaciones durante los ensayos de verificación se realizará con intervalos de tiempo extendido o más largo que los estándares. Los intervalos son más largos para revisar el comportamiento creep. El comportamiento creep se evidencia cuando existen deformaciones que evolucionan con el tiempo a tensión constante una vez aplicada la carga

3.3.5.3. Evaluación a compresión del grupo

- **Suelos Cohesivos**

Para suelos cohesivos, es función de la distancia “s” centro a centro de los micropilotes y del contacto entre el encepado y el suelo de superficie.

En la Tabla 18 se pueden consultar los factores de eficiencia

Tabla 18. Factores de eficiencia para grupos en suelos cohesivos. Table 5-3. Efficiency Factors for Micropile Groups in Cohesive Soils. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

Case	Efficiency Factor, η
If cap is in firm contact with the ground	1.0
If cap is not in firm contact with the ground and the ground is stiff (i.e., undrained shear strength of the soil is greater than 95 kPa (1 ton per square ft (tsf)))	1.0
If the cap is not in firm contact with the ground and the ground is relatively soft (i.e., undrained shear strength of the soil is less than 95 kPa (1 tsf)) or is disturbed	
<ul style="list-style-type: none"> • $s = 2.5 D_b$ • $s = 3.0 D_b$ • $s = 6.0 D_b$ • $3.0 D_b < s < 6.0 D_b$ 	0.65 0.70 1.0 Interpolate between 0.70 and 1.0

A espaciamientos pequeños, se debe evaluar el potencial de falla de bloque. Para un grupo con ancho B_g , longitud L_g y profundidad D, la capacidad última del grupo es:

$$Q_g = (2B_g + 2L_g)D \times \bar{s}_u + B_g L_g \times N_c s_u$$

Donde \bar{s}_u , es la resistencia no drenada media a lo largo de la longitud del grupo y s_u es la resistencia no drenada en la base.

El factor de capacidad se evaluar como:

$$N_c = 5 \left(1 + \frac{0.2B_g}{L_g} \right) \left(1 + \frac{0.2D}{B_g} \right) \text{ para } \frac{D}{B_g} \leq 2.5$$

$$N_c = 7.5 \left(1 + \frac{0.2B_g}{L_g} \right) \text{ para } \frac{D}{B_g} > 2.5$$

En la Figura 20 se ilustra un diagrama para el análisis de la falla en bloque

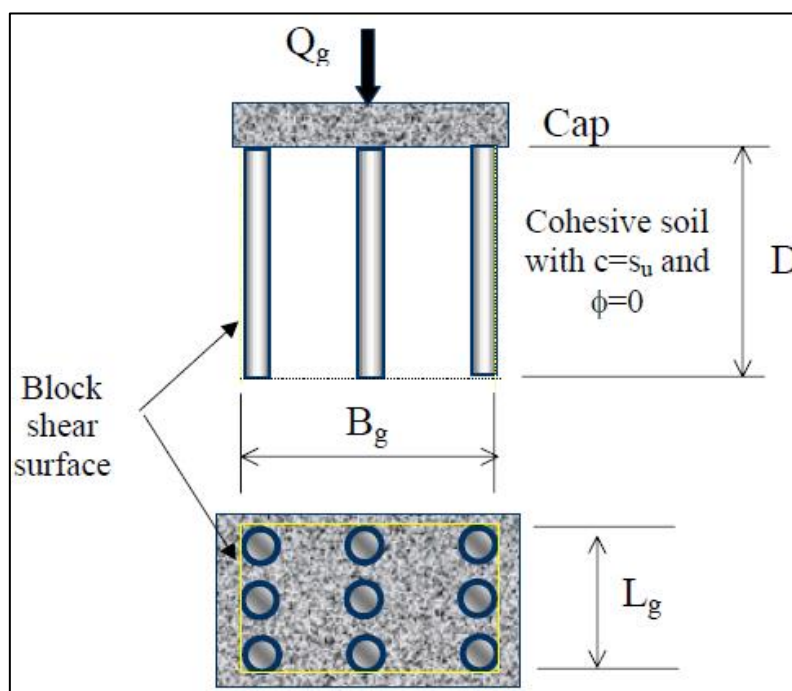


Figura 20. Falla en bloque. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

La capacidad del grupo se evalúa como sigue:

$$Q_g = (\alpha_{bond} \times \pi \times D_b \times L_b) \times N^{\circ} \text{elementos} \times \eta$$

Se calcula la capacidad para falla en bloque y se usa el menor valor para diseño. Para capacidad admisible se usa un FS de 2.0.

- **Suelos Friccionantes**

Si se mantiene una separación mayor a $3D_b$, se puede calcular la capacidad con el número de elementos y una eficiencia de 1.0.

3.3.6. Estimación de asentamientos

Se pueden usar los mismos que pilas, teniendo en cuenta el asentamiento del suelo y el acortamiento elástico del micropilote. Generalmente, se controla el asentamiento diferencial entre apoyos.

3.3.6.1. Asentamiento de grupos

Se usa el concepto de zapata equivalente, para lo cual se tienen dos casos: (1) perfil uniforme y (2) perfil con capa de arcilla. En la Figura 21 y Figura 22 se presentan los dos casos.

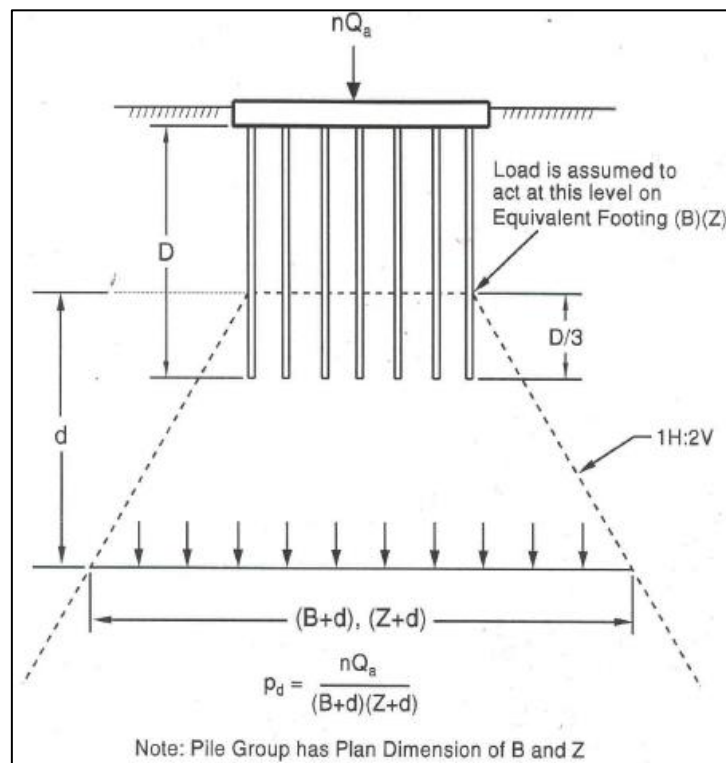


Figura 21. Zapata equivalente suelos perfil homogéneo. Equivalent Footing Concept for Uniform Soil (after FHWA-NHI-05-042, 2005). FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

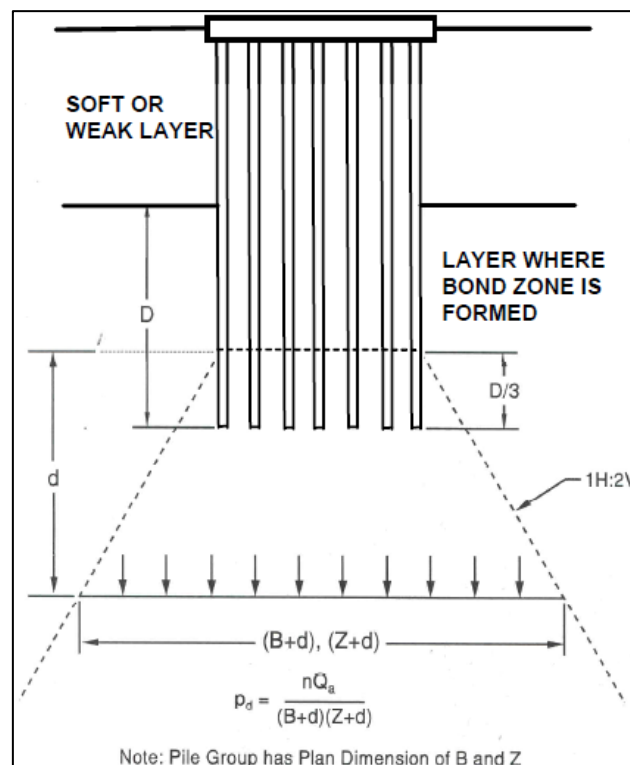


Figura 22. Zapata equivalente suelos perfil con arcilla. Equivalent Footing Concept for Firm Soil Underlying Soft Soil Layer. FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

- **Suelos Cohesivos**

- Determinar la ubicación de la zapata equivalente
- Determinar las dimensiones de la zapata equivalente
- Determinar la distribución de pensiones hasta 10% de la carga
- Dividir las capas en capas pequeñas entre 1.5 a 3.0 m
- Determinar el esfuerzo medio en cada capa
- Determinar el cambio en el nivel de esfuerzos
- Determinar parámetros de consolidación
- Estimar los asentamientos con una ecuación acorde a las condiciones.

- **Suelos Friccionantes**

- Determinar la ubicación de la zapata equivalente
- Determinar las dimensiones de la zapata equivalente
- Determinar la distribución de pensiones hasta 10% de la carga
- Dividir las capas en capas pequeñas entre 1.5 a 3.0 m, esta es la H para el cálculo de asentamientos
- Determinar el esfuerzo medio en cada capa
- Determinar el cambio en el nivel de esfuerzos

- Determinar el índice de soporte de cada capa (con base en N_{60} , ver Figura 23)
- Estimar los asentamientos para cada capa y sumarlos :

$$\Delta H = H_0 \frac{1}{C'} \log \left(\frac{p' + \Delta p'}{p'} \right) \quad \text{siendo} \quad \frac{1}{C'} = \frac{Cc}{1 + e^0}$$

para suelos normalmente consolidados

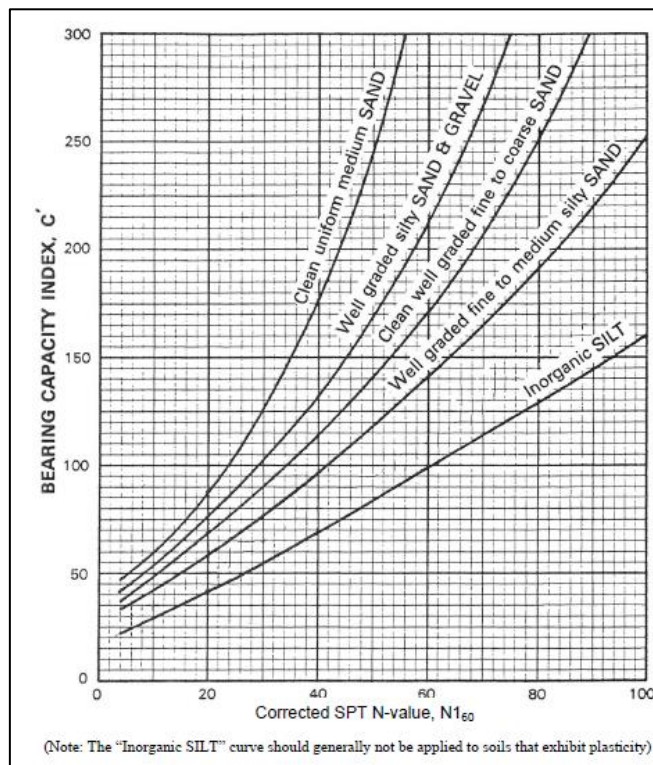


Figura 23. Gráfico para determinar índice de soporte. Bearing Capacity Index versus Corrected SPT Blowcount (modified after Hough, 1959). FHWA NHI-05-039 Chapter 5 – Design for Structure Foundations, December 2005

3.3.6.2. Acortamiento elástico

Se puede determinar como:

$$\Delta_{elas} = \frac{PL}{AE}$$

Donde P es la carga, L es longitud, A es el área de la sección y E módulo de la sección.

Para cargas de compresión, la rigidez de la sección compuesta en un punto, puede ser evaluada como:

$$EA_{pile} = [A_{grout}E_{grout}] + [A_{steel}E_{steel}]$$

El valor de E_{grout} puede variar mucho, para fases de diseño puede ser estimado como:

$$E_{grout}[MPa] = 4732 \times \sqrt{f'_c}$$

CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE CARGA. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Luego de una búsqueda de información, se seleccionaron 9 sitios en diferentes geologías del Valle de Aburrá, en los cuales se tenía tanto información de pruebas de carga sobre micropilotes como lo referente al estudio de suelos del sitio. Así, se lograron recopilar 28 pruebas sobre micropilotes con longitudes variables entre 6.5 m y 20.0 m, usados principalmente como elementos de cimentación.

En el desarrollo de los cálculos teóricos a partir de las metodologías escogidas, rápidamente se hicieron notar las siguientes limitantes:

- La confiabilidad de los resultados de los modelos teóricos depende marcadamente de la calidad de la información de estudios de suelos. Los parámetros geotécnicos que alimentan las ecuaciones generan gran sensibilidad en los resultados finales.
- El juicio y rigurosidad del diseño y construcción del montaje para pruebas de carga así como su misma ejecución y análisis juegan otro papel muy importante.

Frente a estas dos limitaciones tan importantes se abrió la oportunidad para proponer la definición de la metodología que mejor se ajuste y con qué grado de confiabilidad al ejercicio de los proyectos de cimentaciones en micropilotes. Se propone un ajuste para dichos resultados de carga ya que en el entorno local existen muchos participantes como contratistas de perforación, consultores en geotecnia, consultores estructurales, constructores y dueños de obras que inciden en la variabilidad.

En la revisión documental se encontró que la mayoría de los estudios geotécnicos de suelos en algunos casos no tienen el detalle de información para garantizar una buena confiabilidad en los procesos de análisis ni en los resultados de cargas sobre micropilotes. Las condiciones de ejecución de pruebas de carga, los procedimientos técnicos y rigurosidad en los análisis influyen en gran forma en el resultado de prueba de carga a compresión.

Esta propuesta pretende aportar en la etapa de pre-dimensionamiento y dimensionamiento de micropilotes en proyectos que tengan poca información geotécnica y precisamente en este tipo de proyectos en donde las conclusiones de los documentos resultan valiosas.

En el Anexo 1 se muestran los resúmenes de estudios geotécnicos, parámetros de suelos y consideraciones particulares de obra, disponibles para cada proyecto.

Tabla 19. Resumen de proyectos y pruebas de cargas

CODIFICACIÓN Y NOMBRE DE PROYECTO	Numeración	PRUEBA DE CARGA A COMPRESIÓN
3088 - ALEJANDRIA	-3	Prueba No 1
	-2	Prueba No 2
	-1	Prueba No 3
3089 – SABANETA 1	1	Prueba No 1
	2	Prueba No 2
	3	Prueba No 3
	4	Prueba No 4
	5	Prueba No 5
3091 – SABANETA 2	6	Prueba No 1
	7	Prueba No 2
	8	Prueba No 3
	9	Prueba No 4
	10	Prueba No 5
	11	Prueba No 6
3106 – RIONEGRO 1	12	Prueba No 1
	13	Prueba No 2
3110 – MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 1	14	Prueba No 1
3113 – ESTRIBO PUENTE RIONEGRO	15	Prueba No 1
3114 – SABANETA 3	16	Prueba No 1
	17	Prueba No 2
	18	Prueba No 3
3135 – MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 2	19	Prueba No 1
3136 – MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 3	20	Prueba No 1
3144 – RIONEGRO 2	21	Prueba No 1
	22	Prueba No 2
	23	Prueba No 3
ADC1 –RIONEGRO 3	24	Prueba No 1
ADC2 – SABANETA 4	25	Prueba No 1

Tabla 20. Caracterización de micropilotes

Información de proyecto			D [m]	L [m]	Pi (PSI)	Tipo de suelo	
ID Proyecto	Nombre	Micropilote					
1	3089	SABANETA 1	Micropilote 3	0.15	11.6	130	Saprolito Migmatitas
2	3089	SABANETA 1	Micropilote 8	0.15	11.6	130	Saprolito Migmatitas
3	3089	SABANETA 1	Micropilote B19-3	0.15	11.6	130	Saprolito Migmatitas
4	3089	SABANETA 1	Micropilote C17-47	0.15	13.7	130	Saprolito Migmatitas
5	3089	SABANETA 1	Micropilote B-15-117	0.15	14.0	130	Saprolito Migmatitas
6	3091	SABANETA 2	Micropilote MP-Q2	0.15	15.5	50	Residual Migmatitas
7	3091	SABANETA 2	Micropilote MP-E6-2	0.15	15.5	50	Residual Migmatitas
8	3091	SABANETA 2	Micropilote MP-D11	0.15	15.5	50	Residual Migmatitas
9	3091	SABANETA 2	Micropilote MP-O6	0.15	15.5	50	Residual Migmatitas
10	3091	SABANETA 2	Micropilote MP-M1	0.15	15.5	50	Residual Migmatitas
11	3091	SABANETA 2	Micropilote MP-S2	0.15	15.5	50	Residual Migmatitas
12	3106	RIONEGRO 1	Micropilote 124	0.13	6.5	130	Lleno
13	3106	RIONEGRO 1	Micropilote 83	0.13	6.5	130	Lleno
14	3110	MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 1	Micropilote PP	0.31	7.0	50	Residual Batolito
15	3113	ESTRIBO PUENTE RIONEGRO	Micropilote MP 4	0.11	15.0	130	Roca Batolito
16	3114	SABANETA 3	Micropilote MP P-17	0.11	15.0	145	Saprolito Migmatitas
17	3114	SABANETA 3	Micropilote MP F- 4	0.11	15.0	145	Saprolito Migmatitas
18	3114	SABANETA 3	Micropilote MP B-13	0.11	15.0	145	Saprolito Migmatitas
19	3135	MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 2	Micropilote PP	0.20	9.0	50	Residual Batolito
20	3136	MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 3	Micropilote PP	0.20	9.0	50	Residual Batolito – Transición Roca
21	3144	RIONEGRO 2	Micropilote MP-P1	0.11	18.0	50	Saprolito Batolito
22	3144	RIONEGRO 2	Micropilote MP-P2	0.11	15.0	50	Saprolito Batolito
23	3144	RIONEGRO 2	Micropilote MP-P3	0.11	15.0	50	Saprolito Batolito
24	ADC-1	RIONEGRO 3	Micropilote 1	0.20	15.0	50	Saprolito Roca Batolito
25	ADC-2	SABANETA 4	Micropilote 1	0.20	26.0	50	Suelo residual Migmatitas

Tabla 21. Resumen de pruebas de carga sobre micropilotes, información técnica

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
3088 - ALEJANDRIA	Prueba No 1	Micropilote de prueba entre Micropilote 67-71	Autoperforantes	12 cm (4.7 ")	15	1x R38-550	Inyección tipo D IRS 10 sacos de lleno y 4 sacos de inyección	150	Saprolito de cuarzdiorita (batolito antioqueño)	Deformación promedio de 5.32 mm para una carga de 100.8 t sin llegar a la falla
	Prueba No 2	Micropilote de prueba entre Micropilote 36-40	Prebarrenado	12 cm (4.7 ")	15	1x R38-550	Inyección tipo D IRS 10 sacos de lleno y 4 sacos de inyección	250	Saprolito de cuarzdiorita (batolito antioqueño)	Primera Prueba: Deformación promedio de 13.48 mm para una carga de 36.3 t sin llegar a la falla Segunda Prueba: Deformación promedio de 11.38 mm para una carga de 86.7 t sin llegar a la falla
	Prueba No 3	Micropilote de prueba entre Micropilote 3	Prebarrenado	12 cm (4.7 ")	15	1x R38-550	Inyección tipo D IRS 6 sacos de lleno y 6 sacos de inyección	180	Saprolito de cuarzdiorita (batolito antioqueño)	Deformación promedio de 15.9 mm para una carga de 86.7 t sin llegar a la falla
3089 – SABANETA 1	Prueba No 1	Micropilote 3	Prebarrenado	15 cm (6")	11,6	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	Inyección tipo D IRS 4 sacos de lleno y 12 sacos de inyección	130	Suelo residual [0-14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño [14.00-18.00]m y roca descompuesta [18.00-21.00]m.	Deformación promedio de 3,56mm 51,9 t fallando

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
	Prueba No 2	Micropilote 8	Prebarrenado	15 cm (6")	11,6	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	Inyección tipo D IRS 10 sacos de lleno y 4 sacos de inyección	130	Suelo residual [0-14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) [14.00-18.00]m y roca descompuesta [18.00-21.00]m.	Deformación promedio de 3,18 mm 51,9 t fallando
	Prueba No 3	Micropilote B19-3	Prebarrenado	15 cm (6")	11,6	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	Inyección tipo D IRS 4 sacos de lleno y 12 sacos de inyección	130	Suelo residual [0-14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) [14.00-18.00]m y roca descompuesta [18.00-21.00]m.	Deformación promedio de 10,9 mm 61,4 t fallando
	Prueba No 4	Micropilote C17-47	Prebarrenado	15 cm (6")	13,7	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	Inyección tipo D IRS 10 sacos de lleno y 18 sacos de inyección	130	Suelo residual [0-14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) [14.00-18.00]m y roca descompuesta [18.00-21.00]m.	Deformación promedio de 9,25 mm 53,2 t fallando
	Prueba No 5	Micropilote B-15-117	Prebarrenado	15 cm (6")	14	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	Inyección tipo D IRS 7 sacos de lleno y 16 sacos de inyección	130	Suelo residual [0-14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) [14.00-18.00]m y roca descompuesta [18.00-21.00]m.	Deformación promedio de 25,1 mm 57,9 t fallando

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
3091 – SABANETA 2	Prueba No 1	Micropilote MP-Q2	Prebarrenado	15 cm (6")	15,5	2x No8 corrugada G60	Inyección tipo D IRS 4 sacos de lleno y 2 sacos de inyección	130	Limo arcilloso arenoso [0.50 - 14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) Roca descompuesta en arena limo arcillosa[14.0 - 27.5]m.	Deformación promedio de 10.1 mm 30.7 t
	Prueba No 2	Micropilote MP-E6-2 con reacciones MP-G5, MP-G7, MP-C5 y MP-C7	Autoperforantes	15 cm (6")	15,5	1x R38-550	Inyección tipo E 6 sacos de lleno	130	Limo arcilloso arenoso [0.50 - 14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) Roca descompuesta en arena limo arcillosa[14.0 - 27.5]m.	Primera Prueba: Deformación promedio de 13.1 mm para una carga de 40.9 t fallando Segunda Prueba: Deformación promedio de 17.2 mm para una carga de 61.4 t sin llegar a la falla
	Prueba No 3	Micropilote MP-D11 con reacciones MP-F11, MP-E11, MP-B11 y MP-C11	Prebarrenado	15 cm (6")	15,5	2x No8 corrugada G60	Inyección tipo D IRS 4 sacos de lleno y 12 sacos de inyección	130	Limo arcilloso arenoso [0.50 - 14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) Roca descompuesta en arena limo arcillosa[14.0 - 27.5]m.	Deformación promedio de 8.3 mm 40.9 t

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
	Prueba No 4	Micropilote MP-O6	Autoperforantes	15 cm (6")	15,5	1x R38-550	Inyección tipo D IRS 5 sacos de lleno y 2 sacos de inyección	130	Limo arcilloso arenoso [0.50 - 14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) Roca descompuesta en arena limo arcillosa[14.0 - 27.5]m.	Deformación promedio de 17.83 mm 40,9 t
	Prueba No 5	Micropilote MP-M1	Autoperforantes	15 cm (6")	15,5	1x R38-550	Inyección tipo D IRS 4 sacos de lleno y 2 sacos de inyección	130	Limo arcilloso arenoso [0.50 - 14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) Roca descompuesta en arena limo arcillosa[14.0 - 27.5]m.	Deformación promedio de 34.8 mm 35.3 t
	Prueba No 6	Micropilote MP-S2	Autoperforantes	15 cm (6")	15,5	1x R38-550	Inyección tipo D IRS 4 sacos de lleno y 4 sacos de inyección	130	Limo arcilloso arenoso [0.50 - 14.00]m, Saprolito de granodiorita batolito antioqueño) Roca descompuesta en arena limo arcillosa[14.0 - 27.5]m.	Deformación promedio de 12.5 mm 42.26 t
3106 – RIONEGRO 1	Prueba No 1	Micropilote 124	Prebarrenado	12,7 cm (5")	6,5	1x No7 corrugada G60	Inyección tipo D IRS 7 sacos de lleno y 2 sacos de inyección	130	Lleno antrópico [0-3.50]m, depósitos aluviales finos [3.50 - 6.00]m y depósitos aluviales medio gruesos [6.00-8.00]m.	Deformación promedio de 5,16 mm 19,1 ton sin fallar

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
	Prueba No 2	Micropilote 83	Prebarrenado	12,7 cm (5")	6,5	1x No7 corrugada G60	Inyección tipo D IRS 3 sacos de lleno y 7 sacos de inyección	130	Lleno antrópico [0-3.50]m, depósitos aluviales finos [3.50 - 6.00]m y depósitos aluviales medio gruesos [6.00-8.00]m.	Deformación promedio de 18,45 mm 19,1 t sin fallar
3110 - MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 1	Prueba No 1	Micropilote PP con reacciones PR1 Y PR2	Prebarrenado	30 cm (12")	7	1x Canasta 4 No6 corrugada G60 x espiral de 1/4	Inyección tipo B IU 15 sacos de lleno	145	Lleno antrópico [0-0.50]m, capa vegetal [0.50-0.80], ceniza volcánica [0.80-2.05]m y suelo granular fino compuesto por limo altamente plástico [2.05-11.80]m	Deformación promedio de 1.7 mm 16.4 t sin fallar
3113 – ESTRIBO PUENTE RIONEGRO	Prueba No 1	Micropilote MP 4 estribo derecho	Autoperforantes	11,43 cm (4.5")	15	1x R51-660	Inyección tipo E 10 sacos de lleno	120	Saprolito de granodiorita y roca sana (batolito antioqueño)	Deformación promedio de 6.13 mm 66.5 t sin fallar

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
3114 – SABANETA 3	Prueba No 1	Micropilote MP P-17	Prebarrenado	11,43 cm (4.5")	15	1x No 10 Helicoidal G75	Inyección tipo D IRS 2 sacos de lleno y 15 sacos de inyección	145	Limo arenoso arcilloso [0-13.00]m, arcilla limo arenosa [13.00 - 28.00]m.	Deformación promedio de 22.7 mm 36.8 t sin fallar
	Prueba No 2	Micropilote MP F- 4	Prebarrenado	11,43 cm (4.5")	18	1x No 10 Helicoidal G75	Inyección tipo D IRS 2 sacos de lleno y 17 sacos de inyección	145	Limo arenoso arcilloso [0-13.00]m, arcilla limo arenosa [13.00 - 28.00]m.	Deformación promedio de 12.2 mm 40.9 t sin fallar
	Prueba No 3	Micropilote MP B-13	Prebarrenado	11,43 cm (4.5")	20	1x No 10 Helicoidal G75	Inyección tipo D IRS 2 sacos de lleno y 19 sacos de inyección	145	Limo arenoso arcilloso [0-13.00]m, arcilla limo arenosa [13.00 - 28.00]m.	Deformación promedio de 8.2 mm 40.9 t sin fallar

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
3135 - MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 2	Prueba No 1	Micropilote PP con reacciones PR1 Y PR2	Prebarrenado	20 cm (7.8")	9	1x Canasta 4 No3 corrugada G60 x espiral de 1/4	Inyección tipo B IU 12 sacos de lleno	145	Cenizas volcánicas [0 - 1.50]m, flujos de lodos [1.50 - 3.50]m y suelo residual de batolito antioqueño con roca fracturada [3.50 - 9.00]m	Deformación promedio de 5.3 mm 23.5 t sin fallar, una de las reacciones se desprendió.
3136 - MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 3	Prueba No 1	Micropilote PP con reacciones PR1 Y PR2	Prebarrenado	20 cm (7.8")	9	1x Canasta 4 No3 corrugada G60 x espiral de 1/4	Inyección tipo B IU 9 sacos de lleno	145	Cenizas volcánicas [0 - 1.50]m, flujos de lodos [1.50 - 3.50]m y suelo residual de batolito antioqueño con roca fracturada [3.50 - 9.00]m	Deformación promedio de 6.3 mm 47.8 ton sin fallar Y 49 t a la falla

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACIÓN	TIPO DE MICROPILOTES	DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD [m]	REFUERZO	TIPO DE INYECCIÓN	PRESION DE INYECCIÓN [psi]	TIPO DE SUELO	RESULTADOS
3144 – RIONEGRO 2	Prueba No 1	Micropilote MP-P1-MF con reacciones MR1 Y MR2	Autoperforantes	11,43 cm (4.5")	18	1x R32-360	Inyección tipo E 12 sacos de lleno	130	Deposito lacustre [1.50 - 6.50]m , Suelo Residual IB de Batolito Antioqueño [6,50 - 14.00]m y Suelo IC [14.00 - 20.00]m	Deformación promedio de 21.4 mm 35.8 t sin fallar
	Prueba No 2	Micropilote MP-P2-MF con reacciones MR1 Y MR2	Autoperforantes	11,43 cm (4.5")	15	1x R32-360	Inyección tipo E 6 sacos de lleno	130	Deposito lacustre [1.50 - 6.50]m , Suelo Residual IB de Batolito Antioqueño [6,50 - 14.00]m y Suelo IC [14.00 - 20.00]m	Deformación promedio de 15.5 mm 35.8 t sin fallar
	Prueba No 3	Micropilote MP-P3-MF con reacciones MR1 Y MR2	Autoperforantes	11,43 cm (4.5")	15	1x R32-360	Inyección tipo E 6 sacos de lleno	130	Deposito lacustre [1.50 - 6.50]m , Suelo Residual IB de Batolito Antioqueño [6,50 - 14.00]m y Suelo IC [14.00 - 20.00]m	Deformación promedio de 58.6 mm 26.6 t sin fallar
	Prueba No 4	Micropilote SO-T1 junto con 4 reacciones	Autoperforantes	15 cm (6")	16	1x R32-360	No hay información al respecto		Deposito lacustre [1.50 - 6.50]m , Suelo Residual IB de Batolito Antioqueño [6,50 - 14.00]m y Suelo IC [14.00 - 20.00]m	Deformación promedio de 30 mm 53 t sin fallar
ADC1 – RIONEGRO 3	Prueba No 1	Único ensayado	Prebarrenado	20 cm (8")	15	Desconocido	Tipo D IRS	Desconocido	Deposito aluvial fino [0 - 5,0]m , Suelo Residual IC [5,0 - 15,0]m	Deformación promedio de 5,4 mm 51,4 t sin fallar
ADC2 – SABANETA 4	Prueba No 1	Único ensayado	Prebarrenado	20 cm (8")	26	5 x No 10 corrugada G60	Tipo D IRS	Desconocido	Lleno [0.0 - 3.5]m, Depósito Ladera [3.5 - 15]m y Suelo residual [15 - 27]m	Deformación promedio de 18 mm 200 t sin fallar

Tabla 22. Resumen de parámetros geotécnicos del suelo

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	MICROPILOTE	SONDEO	ESTRATO	Álvaro González (1999)		NIVEL DE AGUA FREÁTICA [m]	MUESTRA	PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA [m]	CLASIFICACION SUCS	% FINOS	% ARENAS	% GRAVAS	PROFUNDIDAD DE DESCAPOTE
				C (cohesión)	Φ (Angulo de fricción)								
3088 - ALEJANDRIA													
3089 – SABANETA 1		SPT 1	Suelo residual Fino			1	M-1	11	SM				Corte de 6.00 metros
			Saprolito Arena										
			Roca descompuesta										
3091 – SABANETA 2		SPT 1	Limo arenoso arcilloso [1.45-14.45]m	0	28,2	3	M-1		SM				Corte de 5.00 metros
			Arcilla limo arenosa [14.45-25.45]m	61,996	15,9								
		SPT 3	Limo arenoso arcilloso [1.45-10.45]m	0	25,8	18	M-3		SM				
3106 – RIONEGRO 1	Mp 124	SPT 6	Lleno heterogéneo [1.50-4.50]m	3,2	22,1	3	M-4	4,45	SM	13,00	70,50	16,50	Lleno de 3.00 metros
			Depósitos aluviales [4.50-5.50]m	0	27,9		M-5	5,45	SM	17,40	58,90	23,70	
							M-6	6,45	SM	17,40	55,60	27,00	
	MP 83	SPT 7	Lleno heterogéneo [1.50-4.50]m	8,5	17,7	3	M-4	4,45	SM	48,40	51,10	0,50	
			Depósitos aluviales [4.50-5.50]m	0	35,3		M-5	5,45	SM	8,10	60,20	15,80	

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	MICROPILOTE	SONDEO	ESTRATO	Álvaro González (1999)		NIVEL DE AGUA FREÁTICA [m]	MUESTRA	PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA [m]	CLASIFICACION SUCS	% FINOS	% ARENAS	% GRAVAS	PROFUNDIDAD DE DESCAPOTE
				C (cohesión)	Φ (Angulo de fricción)								
3110 – MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 1	MP PP	STP 4	Cenizas volcánicas [0-2.80]m	0	25,0	3	M-2	3	ML				Corte de 3.00 metros
			Suelo Residual Limo [2.80-7.50]m	0	31,1								
			Saprolito Arena [8.10 - 11.80]m	0	35,6								
3113 - ESTRIBO PUENTE RIONEGRO	MP 4 ESTRIBO DERECHO	SPT 1	Arena pasando a un limo arcilloso [0-9.75]m	0	33,6	2	M-2	3,8	ML	32,6	58,1	9,3	Corte de 3.00 metros
			arena de grano medio con gravas gruesas [9.75-10.75]m	0	33,6		M-6	7,75	ML	21	71	8	
			Limo y presencia de vetas y puntos de mica [10.75-16.25]m	0	36,2		M-9	12,25	ML	15,8	53,8	30,4	
							M-11	15,25	ML	46,8	48,8	4,4	
3114 – SABANETA 3	MP P 17	STP 3	Limo arenoso arcilloso [0-10.45]m	0	25,8	3							Corte de 5.00 metros
	MP F 4	STP 4	Limo arenoso arcilloso [0-13.45]m	0	27,3	17	M-2		MH				
			Arcilla limo arenosa [13.45-25.45]m	0	29,9								
	MP B 13	STP 1	Limo arenoso arcilloso [0-13.45]m	0	28,2	18							

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	MICROPILOTE	SONDEO	ESTRATO	Álvaro González (1999)		NIVEL DE AGUA FREATICA [m]	MUESTRA	PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA [m]	CLASIFICACION SUCS	% FINOS	% ARENAS	% GRAVAS	PROFUNDIDAD DE DESCAPOTE
				C (cohesión)	Φ (Angulo de fricción)								
			Arcilla limo arenosa [13.45-25.45]m	62	15,8								
3135 - MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 2	MP PP	STP 2	Flujos de lodos [2.00-4.00]m	0	29,8	2,5	M-5	4	MH				Corte de 2.00 metros
			Suelos residuales [4.00-7.00]m	0	33,0								
3136 - MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 3	MP PP	STP 5	Flujos de lodos [2.00-4.00]m	1,25	30,3	2,5	M-3	N.S.E	MH				Corte de 2.00 metros
			Suelos residuales [4.00-7.00]m	0	35,363								
3144 – RIONEGRO 2	MP 1	STP 3	Deposito Lacustre [0-6.5]m	11,6	61,32	N.S.E	M-4	4,45	MH	96,1	3,9	0	Corte de 3.00 metros
			Suelos Residuales IB [7.5-14.5]m	0	32,2		M-9	9,45	ML	57,8	41,9	0,3	
							M-11	11,45	SC	46,8	45,7	7,5	
							M-14	14,45	ML	51,9	48,1	0	
	MP 2	STP 4	Deposito Lacustre [0-6.5]m	0	26,5	0,4	M-5	5,45	CL	51	49	0	Corte de 6.00 metros
			Suelos Residuales IB [7.5-14.5]m	0	37,3		M-7	7,45	SM	48,4	51,6	0	
							M-12	12,45	ML	54,1	45,9	0	
							M-13	13,45	SC	41,2	58,8	0	
	MP 3	STP 1	Deposito Lacustre [0-6.5]m	0	26,5	11,8	M-3	3,45	MH	51	49	0	Corte de 9.00 metros
			Suelos Residuales IB [7.5-14.5]m	0	27,8		M-7	7,45	SM	48,16	51,84	0	
STP 15		Deposito Lacustre [0-6.5]m	0	36,5	N.S.E	M-4	4,45	MH	87,4	12,6	0		
		Suelos Residuales IB [7.5-8.5]m	29,4	28,9		M-7	7,45	SM	42	58	0		

CÓDIGO - NOMBRE DE PROYECTO	MICROPILOTE	SONDEO	ESTRATO	Álvaro González (1999)		NIVEL DE AGUA FREÁTICA [m]	MUESTRA	PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA [m]	CLASIFICACION SUCS	% FINOS	% ARENAS	% GRAVAS	PROFUNDIDAD DE DESCAPOTE
				C (cohesión)	Φ (Angulo de fricción)								
ADC1 – RIONEGRO 3	Sin referencia	P-1	Lieno, materia orgánica y ceniza [0 - 1,4]m	8,3	5,3								
			Depósito aluvial fino [1,40 - 5,0]m	12,0	12,0	2,0	M-1	3,45	MH				
			Suelo Residual IC [5,0 - 12,0]m	9,0	19,0		M-2	7,45	SM-SC				
			Suelo Residual IC duro [12,0 - 15,0]m	18,0	25,0		M-3	15,45	SM-SC				
ADC2 – SABANETA 4	Micropilote 1	T01, T02 y T03	Llenos y cenizas [0-3.5]m	0,0	15,0	12	T-01-24	20,02	MH	87,7	12,3	0	Sin información
			Depósito Ladera [3.5-15]m	12,0	25,0		T-02-32	27,92	ML	82,6	17,4	0	
			Suelo residual [15-27]m	25,0	18,0		T-03-19	17,02	MH	82,9	17,1	0	

Tabla 23. Resumen de especificaciones técnicas de acero de refuerzo de micropilotes

	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACION	REFUERZO	DIAMETRO DE LA BARRA		LIMITE DE FLUENCIA			DIAMETRO DE LAS BARRAS AUTOPERFORANTES	
				[mm]	[m]	KN	kg/cm2	Mpa	INTERNO [mm]	EXTERNO [mm]
3088 - ALEJANDRIA	Prueba No 1	Micropilote de prueba entre Micropilote 67-71	1x Dywi drill R38-550	38	0,038	450	x	x	36,4	18,2
	Prueba No 2	Micropilote de prueba entre Micropilote 36-40	1x Dywi drill R38-550	38	0,038	450	x	x	36,4	18,2
	Prueba No 3	Micropilote de prueba entre Micropilote 3	1x Dywi drill R38-550	38	0,038	450	x	x	36,4	18,2
3089 – SABANETA 1	Prueba No 1	Micropilote 3	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	No 8 = 25.4 y espiral 1/4 =6.35	No 8 = 0.0254 y espiral 1/4 =0.00635	x	f	No 8 = 540 y espiral 1/4 =515	X	X
	Prueba No 2	Micropilote 8	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	No 8 = 25.4 y espiral 1/4 =6.35	No 8 = 0.0254 y espiral 1/4 =0.00635	x	No 8 = 5506 y espiral 1/4 =5251.5	No 8 = 540 y espiral 1/4 =516	X	X
	Prueba No 3	Micropilote B19-3	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	No 8 = 25.4 y espiral 1/4 =6.35	No 8 = 0.0254 y espiral 1/4 =0.00635	x	No 8 = 5506 y espiral 1/4 =5251.5	No 8 = 540 y espiral 1/4 =517	X	X
	Prueba No 4	Micropilote C17-47	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	No 8 = 25.4 y espiral 1/4 =6.35	No 8 = 0.0254 y espiral 1/4 =0.00635	x	No 8 = 5506 y espiral 1/4 =5251.5	No 8 = 540 y espiral 1/4 =518	X	X
	Prueba No 5	Micropilote B-15-117	2x No8 corrugada G60 x espiral de 1/4"	No 8 = 25.4 y espiral 1/4 =6.35	No 8 = 0.0254 y espiral 1/4 =0.00635	x	No 8 = 5506 y espiral 1/4 =5251.5	No 8 = 540 y espiral 1/4 =519	X	X
3091 – SABANETA 2	Prueba No 1	Micropilote MP-Q2	2x No8 corrugada G60	25,4	0,0254	x	5506	540	X	X
	Prueba No 2	Micropilote MP-E6-2 con reacciones MP-G5, MP-G7, MP-C5 y MP-C7	1x Dywi drill R38-550	38	0,038	450	x	x	X	X

	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACION	REFUERZO	DIAMETRO DE LA BARRA		LIMITE DE FLUENCIA			DIAMETRO DE LAS BARRAS AUTOPERFORANTES	
				[mm]	[m]	KN	kg/cm2	Mpa	INTERNO [mm]	EXTERNO [mm]
	Prueba No 3	Micropilote MP-D11 con reacciones MP-F11, MP-E11, MP-B11 y MP-C11	2x No8 corrugada G60	25,4	0,0254	x	5506	540	X	X
	Prueba No 4	Micropilote MP-O6	1x Dywi drill R38-550	38	0,038	450	x	x	36,4	18,2
	Prueba No 5	Micropilote MP-M1	1x R38-550	38	0,038	450	x	x	36,4	18,2
	Prueba No 6	Micropilote MP-S2	1x R38-550	38	0,038	450	x	x	36,4	18,2
3106 – RIONEGRO 1	Prueba No 1	Micropilote 124	1x No7 corrugada G60	22,2	0,0222	x	5506	540	X	X
	Prueba No 2	Micropilote 83	1x No7 corrugada G60	22,2	0,0222	x	5506	540	X	X
3135 - MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 1	Prueba No 1	Micropilote PP con reacciones PR1 Y PR2	1x Canasta 4 No6 corrugada G60 x espiral de 1/4	Canasta No 6 = 19.1 y espiral 1/4 = 6.35	Canasta No 6 = 0.0191 y espiral 1/4 = 0.00635	x	No 4 = 5506 y espiral 1/4 =5251.5	No 4 = 540 y espiral 1/4 =515	X	X
3113 - ESTRIBO PUENTE RIONEGRO	Prueba No 1	Micropilote MP 4 estribo derecho	1x R51-660	51	0,051	540	x	x	48,4	33
3114 – SABANETA 3	Prueba No 1	Micropilote MP P-17	1x No 10 Helicoidal G75	32	0,032	425	x	x	X	X
	Prueba No 2	Micropilote MP F- 4	1x No 10 Helicoidal G75	32	0,032	425	x	x	X	X
	Prueba No 3	Micropilote MP B-13	1x No 10 Helicoidal G75	32	0,032	425	x	x	X	X
3136 - MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 2	Prueba No 1	Micropilote PP con reacciones PR1 Y PR2	1x Canasta 4 No3 corrugada G60 x espiral de 1/4	Canasta No 3 = 9.5 y espiral 1/4 = 6.35	Canasta No 3 = 0.095 y espiral 1/4 = 0.00635	x	No 3 = 5506 y espiral 1/4 =5251.5	No 3 = 540 y espiral 1/4 =515	X	X

	PRUEBA DE CARGA A COMPRESION	IDENTIFICACION	REFUERZO	DIAMETRO DE LA BARRA		LIMITE DE FLUENCIA			DIAMETRO DE LAS BARRAS AUTOPERFORANTES	
				[mm]	[m]	KN	kg/cm2	Mpa	INTERNO [mm]	EXTERNO [mm]
3136 - MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 3	Prueba No 1	Micropilote PP con reacciones PR1 Y PR2	1x Canasta 4 No3 corrugada G60 x espiral de 1/4	Canasta No 3 = 9.5 y espiral 1/4 = 6.35	Canasta No 3 = 0.095 y espiral 1/4 = 0.00635	x	No 3 = 5506 y espiral 1/4 = 5251.5	No 3 = 540 y espiral 1/4 = 515	X	X
3144 – RIONEGRO 2	Prueba No 1	Micropilote MP-P1-MF con reacciones MR1 Y MR2	1x R32-360	32	0,032	280	x	x	29,5	15
	Prueba No 2	Micropilote MP-P2-MF con reacciones MR1 Y MR2	1x R32-360	32	0,032	280	x	x	29,5	15
	Prueba No 3	Micropilote MP-P3-MF con reacciones MR1 Y MR2	1x R32-360	32	0,032	280	x	x	29,5	15
	Prueba No 4	Micropilote SO-T1 junto con 4 reacciones	1x R32-360	32	0,032	280	x	x	29,5	15
ADC1 – RIONEGRO 3	Prueba No 1	Sin Referencia	Sin Referencia							
ADC2 – SABANETA 4	Prueba No 1	Micropilote G60	5 x No 10 corrugada G60	31,8	0,032	333,6	4,2	420	-	-

CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS FRENTE A RESULTADOS DE PRUEBAS DE CARGA

Paralelamente, se realizó una revisión de la literatura disponible sobre el diseño de micropilotes, encontrando que localmente (nivel Colombia) no existe normativa o procedimiento estandarizado alguno.

Las metodologías seleccionadas para la comparación fueron las siguientes:

- (Bustamante & Doix, 1985) Considerada una de las primeras (sino la primera) referencias en cuanto al diseño de micropilotes, por tanto es el punto de partida de muchas metodologías.
- (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2005) Norma Española, la cual presenta dos métodos de diseño, uno racional y otro con base en tablas, destaca en esta metodología la inclusión de la influencia de la presión de inyección.
- (FHWA, Micropile Design and Construction, 2005) Guía de USA, la cual aparte del diseño geotécnico contiene apuntes sobre el diseño estructural, construcción y control en obra de micropilotes.

A partir de los estudios de suelos reportados en todos los proyectos e información de campo que fue posible recopilar por otros canales, se definió despreciar el aporte por punta de todos los elementos tenidos en cuenta y solo se considera aporte por fricción.

Para recopilar la información que cada metodología requiere, se le dio tratamiento mencionado en el capítulo 1.5 METODOLOGÍA a los parámetros de suelo a partir de la poca información disponible y se reporta en el Anexo 1.

En el Anexo 2 se muestran las metodologías aplicadas a cada uno de los micropilotes de proyectos. Existen algunos micropilotes que por sistema constructivo y/o falta de información no pudieron ser analizados por alguna metodología en particular pero si por otra.

Del proyecto 3088 no se logró conseguir información fiel y suficiente para analizar bajo las metodologías propuestas.

Tabla 24. Comparación de resultados entre pruebas de carga ejecutadas y cálculos de métodos analíticos.

Información de proyecto		Metodología de Diseño			Prueba de Carga	Indice de Desviación; $\varepsilon = \text{Teorico/Prueba}$			
		Bustamante	Guía Española	FHWA		ε_B	ε_{GE}	ε_{FHWA}	
ID Proyecto	Micropilote	PuB [t]	PuGE [t]	PuFHWA [t]	PuPC [t]				
1	3089 – SABANETA 1	Micropilote 3	191.59	58.4	70.99	51.9	3.69	1.13	1.37
2		Micropilote 8	191.59	58.4	70.99	51.9	3.69	1.13	1.37
3		Micropilote B19-3	191.59	58.4	70.99	61.4	3.12	0.95	1.16
4		Micropilote C17-47	231.85	79.0	88.17	53.2	4.36	1.49	1.66
5		Micropilote B-15-117	237.60	79.0	90.63	57.3	4.15	1.38	1.58
6	3091 – SABANETA 2	Micropilote MP-Q2	119.03	58.1	130.26	30.7	3.88	1.89	4.24
7		Micropilote MP-E6-2	120.90	57.35	91.79	61.4	1.97	0.93	1.49
8		Micropilote MP-D11	120.90	59.4	130.26	40.9	2.96	1.45	3.18
9		Micropilote MP-O6	119.03	59.4	130.26	40.9	2.91	1.45	3.18
10		Micropilote MP-M1	119.03	57.4	130.26	35.3	3.37	1.63	3.69
11		Micropilote MP-S2	119.03	57.3	130.26	42.26	2.82	1.36	3.08
12	3106 - RIONEGRO 1	Micropilote 124	55.88	11.8	32.32	19.1	2.93	0.62	1.69
13		Micropilote 83	63.20	11.8	32.32	19.1	3.31	0.62	1.69
14	3110 - MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 1	Micropilote PP	104.88	17.47	44.46	16.4	6.40	1.07	2.71
15	3113 - ESTRIBO PUENTE RIONEGRO	Micropilote MP 4	192.94	69.95	56.61	66.5	2.90	1.05	0.85
16	3114 - SABANETA 3	Micropilote MP P-17	119.48	49.05	67.69	36.8	3.25	1.33	1.84
17		Micropilote MP F-4	151.06	37.07	62.74	40.9	3.69	0.91	1.53
18		Micropilote MP B-13	170.12	53.03	62.74	40.9	4.16	1.30	1.53
19	3135 - MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 2	Micropilote PP	110.68	25.6	105.75	23.5	4.71	1.09	4.50
20	3136 - MEDELLÍN ALTO LAS PALMAS 2	Micropilote PP	110.68	39.7	85.74	49	2.26	0.81	1.75
21	3144 - RIONEGRO 2	Micropilote MP-P1	173.18	55.02	64.99	35.8	4.84	1.54	1.82
22		Micropilote MP-P2	143.06	41.92	68.56	35.8	4.00	1.17	1.92
23		Micropilote MP-P3	160.13	49.62	73.24	26.6	6.02	1.87	2.75
24	ADC-1 - RIONEGRO 3	Micropilote 1	196.75	27.67	181.38	30	6.56	0.92	6.05
25	ADC-2 - SABANETA 4	Micropilote 1	381.88	169.74	197.37	201.6	1.89	0.84	0.98

Sobre cada una de las metodologías anteriores, se resumieron sus criterios y se implementaron en hojas de cálculo con el fin de evaluar las estimaciones de la capacidad a compresión de los pilotes con los resultados de las pruebas de carga.

Se establece una relación o índice entre los resultados de cada metodología y la carga última del ensayo de prueba de carga de la siguiente manera:

$$\frac{P_{prueba}}{P_{teórico}} = \varepsilon \text{ índice de desviación}$$

$$\frac{P_{prueba}}{P_{teórico}} \geq 1 \Rightarrow \text{Metodología subestima la capacidad probada del micropilote}$$

$$\frac{P_{prueba}}{P_{teórico}} < 1 \Rightarrow \text{Metodología sobreestima la capacidad probada del micropilote}$$

Este índice permitirá identificar cual metodología presenta mayor aproximación entre el valor estimado teóricamente vs valor obtenido en la prueba de carga, dentro de las limitaciones establecidas en la presente investigación.

Se tiene entonces una tabla resumen que consigna la capacidad del pilote en la prueba de carga y la capacidad estimada con cada una de las metodologías de diseño. Con esta información se espera analizar cuál de las metodologías es la más apropiada para los suelos del Valle de Aburrá y que tan acertadas son estas predicciones.

Los valores P_{uB} [t], P_{uGE} [t], P_{uFHWA} [t] en la Tabla 21 se muestra la carga última calculada por cada una de las metodologías. El valor de P_{uPC} [t] reportando en la misma tabla corresponde con la carga de falla o rotura a compresión de cada una de las pruebas de carga, lo cual muestra que todos los micropilotes se llevaron a la falla por criterio de carga máxima admitida.

En la Figura 25, Figura 27,

Figura 28 se muestran graficas de barras comparación de carga última calculada con cada metodología y la obtenida de la prueba de carga.

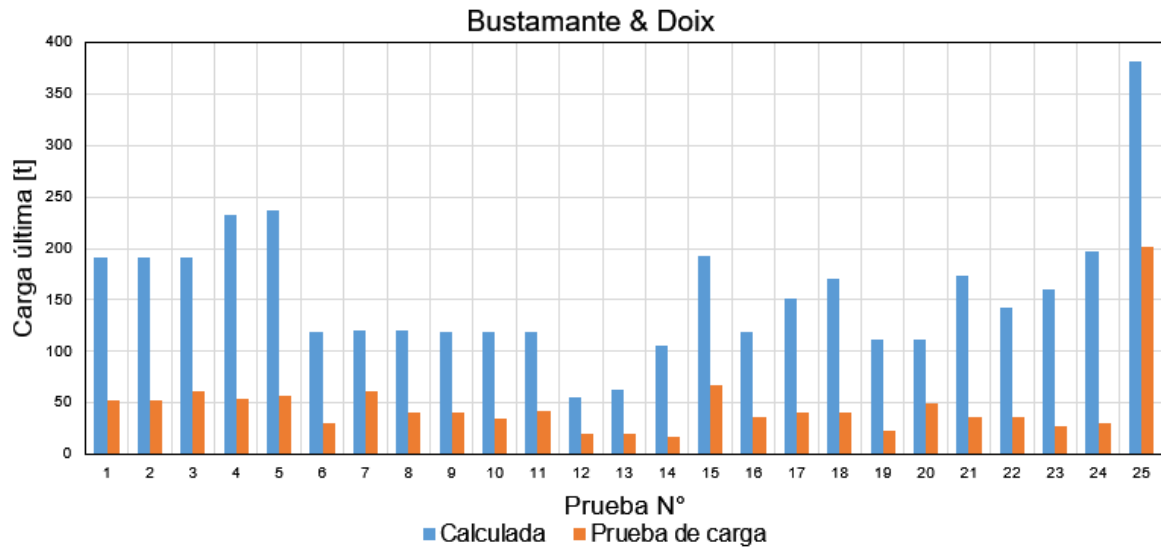


Figura 24. Gráfico carga última calculada Bustamante & Coix – prueba de carga vs número de prueba

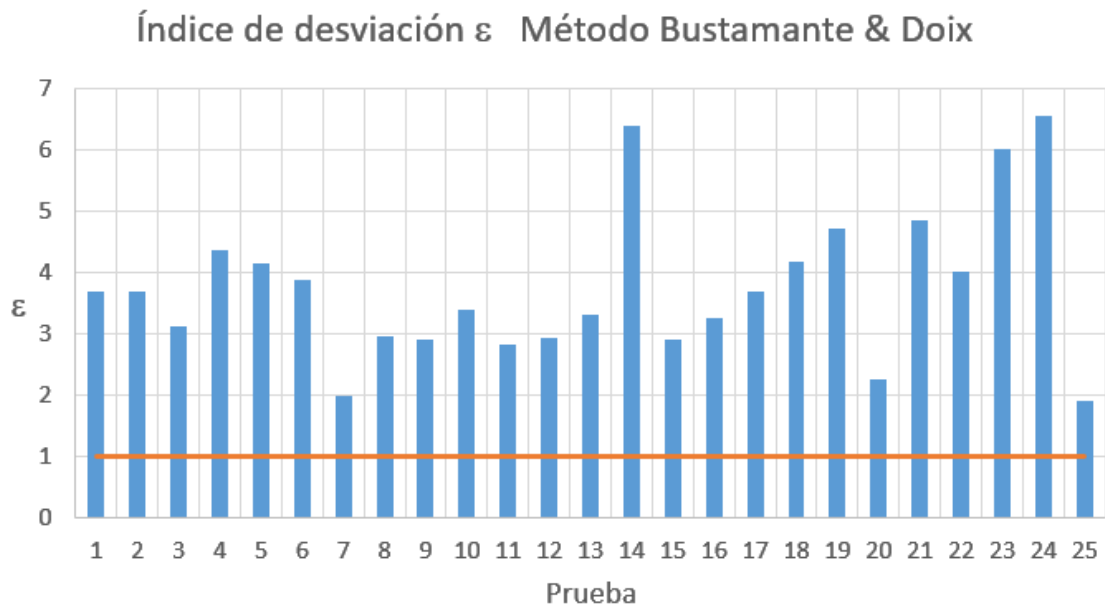


Figura 25. Gráfico carga última calculada Bustamante & Coix – ε índice de desviación

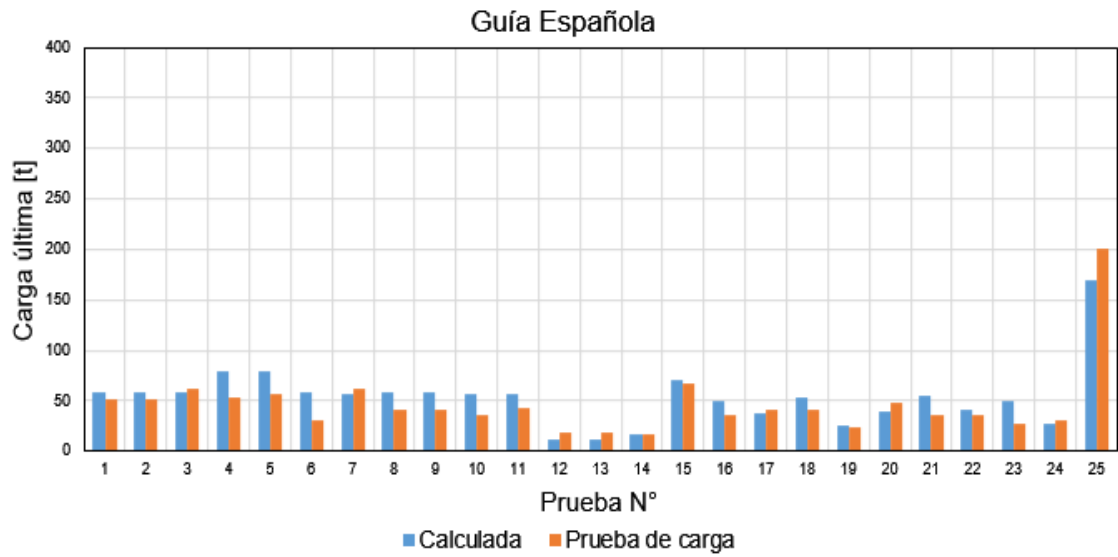


Figura 26. Gráfico carga última calculada Guía Española – prueba de carga vs número de prueba

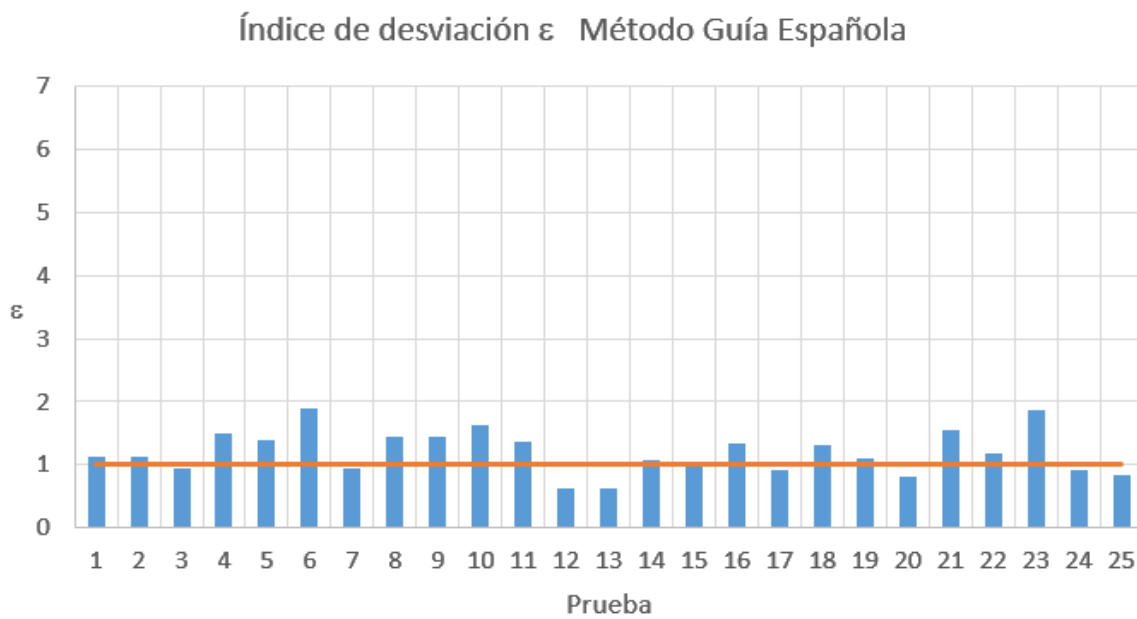


Figura 27. Gráfico carga última calculada Guía Española – ε índice de desviación

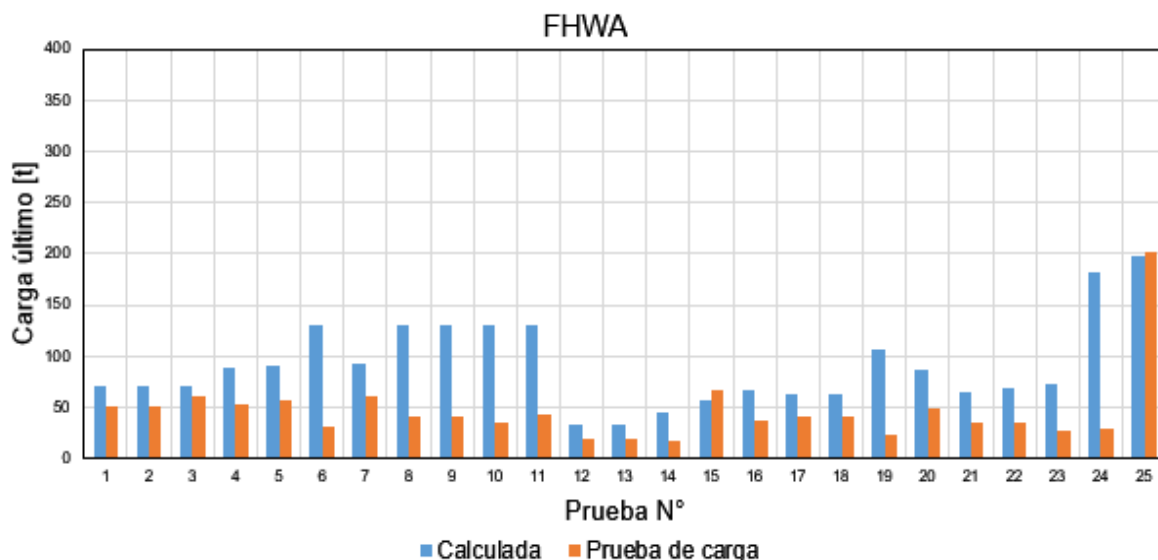


Figura 28. Gráfico carga última calculada FHWA– prueba de carga vs número de prueba

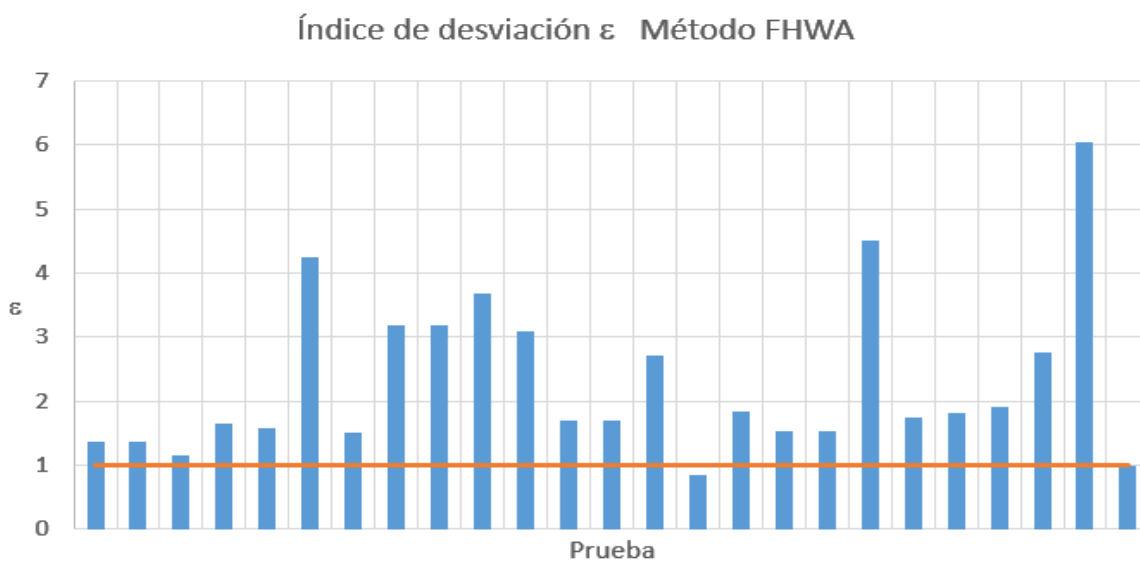


Figura 29. Gráfico carga última calculada FHWA – ε índice de desviación

De estas gráficas es posible identificar las siguientes conclusiones:

- Los valores superiores de carga última P_u se obtienen por la metodología de Bustamante & Doix.
- Los valores intermedios de carga última P_u se obtienen por la metodología propuesta por la FHWA.

- Los valores menores de carga última P_u y más acordes con los resultados de pruebas de carga se obtienen por la metodología de la guía española.

Los resultados más bajos de carga última evidentemente corresponden a los micropilotes de menor longitud, sin embargo se nota que los elementos de los proyectos 3135 y 3136 a pesar de ser de la misma longitud y diámetro, cercanos entre sí, presentan una diferencia importante siendo mayor la carga última del micropilote 3136 que tuvo una instalación en transición de roca hacia el fondo, lo cual indica un posible aporte por punta (el diámetro de 20 cm podrá permitir el trabajo por punta).

El sistema autoperforante que usa inyección simultánea Tipo E genera mejoramiento del suelo y la adherencia de la lechada final. Este tipo de inyección simultánea no está considerada en las metodologías de Bustamante y Guía Española por lo cual estrictamente solo podrán ser tenidos en cuenta por la metodología FHWA. Sin embargo, para mejorar la cantidad de muestras de comparación de la capacidad portante por las dos primeras metodologías se asumió una inyección Tipo B: IGU que constructivamente es la última inyección que se realiza en este sistema y genera el mismo factor de adherencia friccional según la Tabla 17.

El hecho de que la metodología de la Guía Española fue la que más se acercó a los valores de carga última encontrados en las pruebas de carga tiene sentido toda vez que dicha metodología es la que requiere mayor detalle en el manejo de los parámetros geotécnicos.

- Se escoge entonces la Guía Española que mejor ajuste da a los resultados de pruebas de carga de los 25 ensayos por mostrar un valor del ε , índice de desviación más cercano a la unidad.

Tabla 25. Resultados Metodología Guía Española y pruebas de carga – longitud – diámetro – formación – método – presión de inyección

Información de proyecto		Metodología de Diseño	Prueba de Carga	D (m)	L (m)	Pi (PSI)	Prueba de Carga $f=P/A=f(t/m^2)$	Tipo de MP	Suelo	Prueba de Carga promedio $f=P/A=f(t/m^2)$	Pi Construcción (PSI)	
		Guía Española										
ID Proyecto		PuGE [t]	PuPC [t]									
1	3089	SABANETA 1	58.4	51.9	0.15	11.60	130	9.37	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita	9.3	130
2	3089		58.4	51.9	0.15	11.60	130	9.37	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita		
3	3089		58.4	61.4	0.15	11.60	130	11.08	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita		
4	3089		79.0	53.2	0.15	13.70	130	8.13	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita		
5	3089		79.0	57.3	0.15	14.00	130	8.57	Prebarrenado	Residual de Migmatita		
25	ADC-2	SABANETA 4	169.74	201.6	0.20	26.00	120	12.14	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita - Roca meteorizada	12.1	120
6	3091	SABANETA 2	58.1	30.7	0.15	15.50	50	4.15	Prebarrenado	Residual de Migmatita	5.7	130
7	3091		57.3	61.4	0.15	15.50	50	8.30	Prebarrenado	Residual de Migmatita		
8	3091		59.4	40.9	0.15	15.50	50	5.53	Prebarrenado	Residual de Migmatita		
9	3091		59.4	40.9	0.15	15.50	50	5.53	Autoperforante	Residual de Migmatita		
10	3091		57.4	35.3	0.15	15.50	50	4.77	Autoperforante	Residual de Migmatita		
11	3091		57.3	42.26	0.15	15.50	50	5.71	Autoperforante	Residual de Migmatita		
16	3114	SABANETA 3	49.05	36.8	0.11	15.00	145	6.85	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita	7.4	145
17	3114		37.07	40.9	0.11	15.00	145	7.61	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita		
18	3114		53.03	40.9	0.11	15.00	145	7.61	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita		
21	3144	RIONEGRO 2	55.02	35.8	0.11	18.00	50	5.55	Autoperforante	Saprolito de Batolito	5.7	50

Información de proyecto			Metodología de Diseño	Prueba de Carga	D (m)	L (m)	Pi (PSI)	Prueba de Carga $f=P/A=f(t/m^2)$	Tipo de MP	Suelo	Prueba de Carga promedio $f=P/A=f(t/m^2)$	Pi Construcción (PSI)
			Guía Española									
ID Proyecto			PuGE [t]	PuPC [t]								
22	3144		41.92	35.8	0.11	15.00	50	6.66	Autoperforante	Saprolito de Batolito		
23	3144		49.62	26.6	0.11	15.00	50	4.95	Autoperforante	Saprolito de Batolito		
24	ADC-1	RIONEGRO 3	39.36	30	0.20	15.00	50	3.13	Prebarrenado	Saprolito de Batolito	3.1	50
14	3110	MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 1	17.47	16.4	0.31	7.00	14	2.45	Prebarrenado	Residual Batolito	2.4	14
19	3135	MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 2	25.6	23.5	0.20	9.00	50	4.20	Prebarrenado	Residual de Batolito	4.2	50
20	3136	MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 3	39.7	49	0.20	9.00	50	8.75	Prebarrenado	Saprolito y roca meteorizada de Batolito	8.8	50
15	3113	RIONEGRO 1	69.95	66.5	0.11	15.00	130	12.38	Autoperforante	Roca de batolito	12.4	130
12	3106	RIONEGRO	11.8	19.1	0.13	6.50	130	7.36	Prebarrenado	Lleno	7.4	130
13	3106		11.8	19.1	0.13	6.50	130	7.36	Prebarrenado	Lleno		

Basado en lo anterior se profundiza en los análisis de los resultados usando dicha metodología para diferentes proyectos clasificándolos por tipos de suelo y formación geológica.

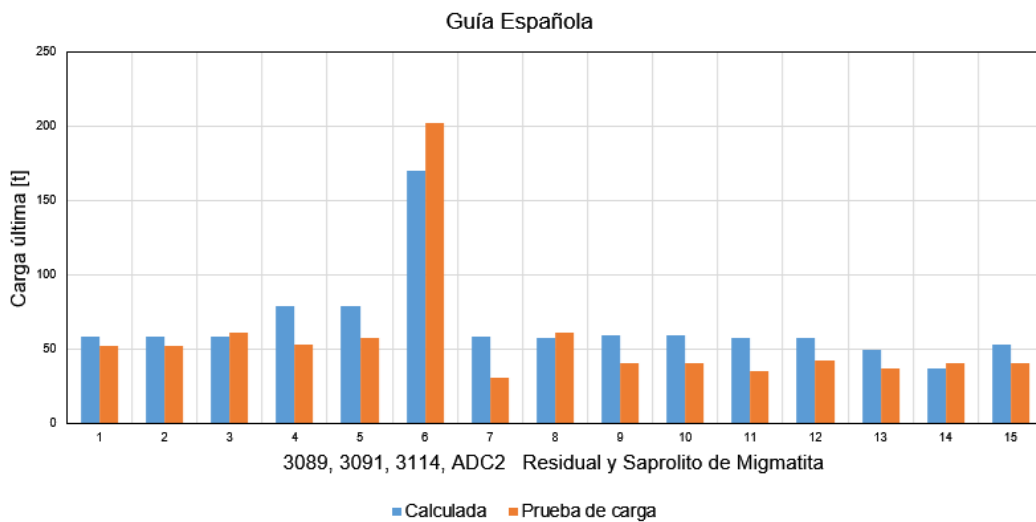


Figura 30. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española – Residual y Saprolito de Migmatita

En la Figura 31Figura 30 se muestra la capacidad de carga de micropilotes resultado de pruebas de carga comparado contra la encontrada usando la metodología de la Guía Española. Se observa que en 10 de las 15 muestras la capacidad de carga real excede a la teórica, y la excede en promedio un 41%.

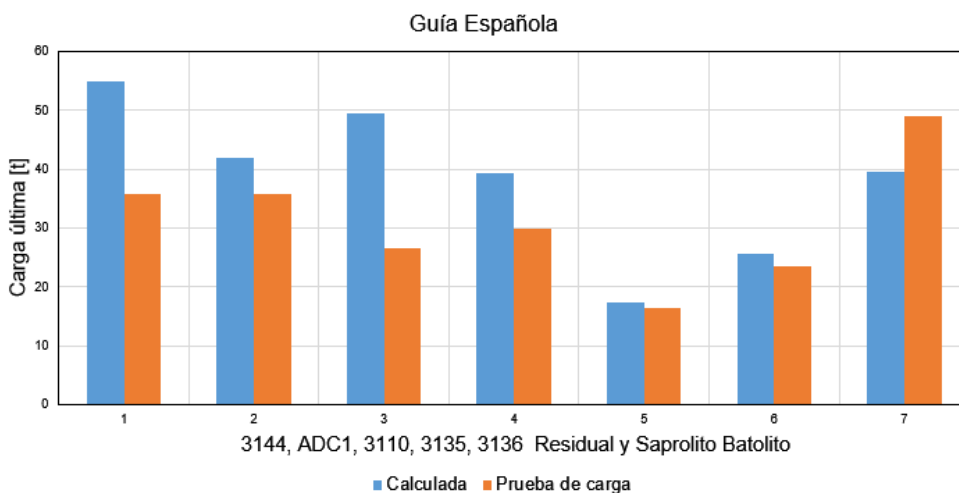


Figura 31. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española – Residual y Saprolito de Batolito

En la Figura 31 se muestra la capacidad de carga de micropilotes resultado de pruebas de carga comparado contra la encontrada usando la metodología de la Guía Española. Se observa que solo 1 de las 7 muestras la capacidad de carga real está por encima de la teórica, y la excede en promedio un 34%.

De la Figura 32 se puede hacer el mismo análisis con los casos de suelo de saprolito o transición y roca. La mayoría de estas muestras indica una mayor capacidad de carga real frente a la calculada y su exceso es del 13%.

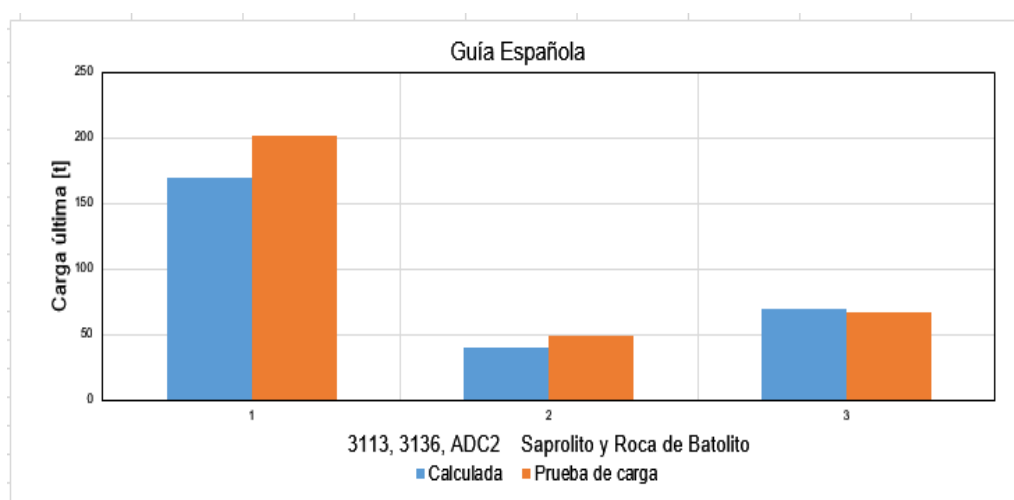


Figura 32. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española – Saprolito, transición y roca de Batolito

En lleno (ver Figura 33) hay 2 muestras cuyos resultados de capacidad de carga experimental están por encima de las calculadas un 62%.

En este suelo se evidencia claramente la subvaloración de la metodología puesto que no tiene en cuenta la inyección en los 5 primeros metros del micropilote, es decir, para este caso sólo calcula capacidad portante entre 5 y 6 metros de profundidad, mientras que la prueba de carga evidencia un trabajo importante de la fricción en todo el fuste.

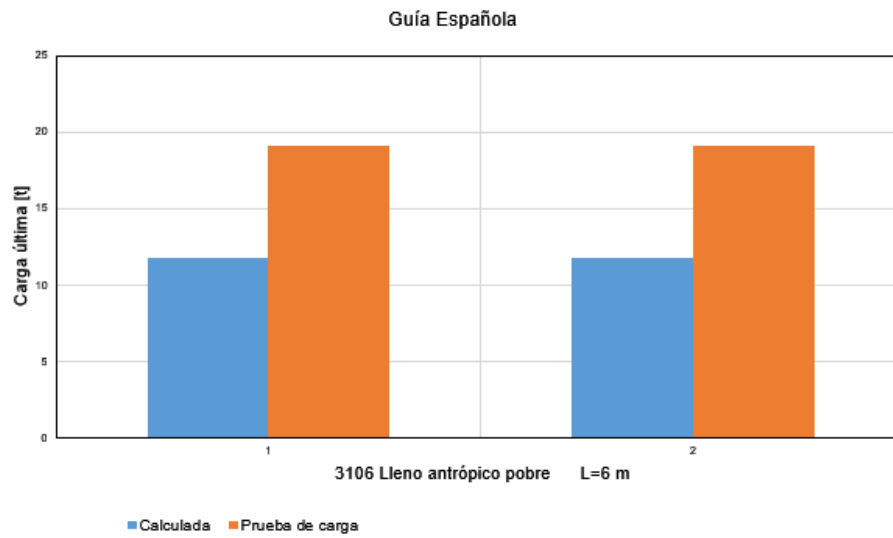


Figura 33. Gráfico capacidad de carga prueba vs capacidad de carga Guía Española – Lleno

Tabla 26. Carga por metro lineal parametrizada

Información de proyecto			D (m)	L (m)	Pi (PSI)	Prueba de Carga $f=P/A=f(t/m^2)$	Tipo de MP	Suelo	Prueba de Carga promedio $f=P/A=f(t/m^2)$	Pi Construcción (PSI)	Carga (t/m)
ID Proyecto											
1	3089	SABANETA 1	0.15	11.60	130	9.37	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita	9.3	130	4.5
2	3089		0.15	11.60	130	9.37	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita			4.5
3	3089		0.15	11.60	130	11.08	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita			5.3
4	3089		0.15	13.70	130	8.13	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita			3.9
5	3089		0.15	14.00	130	8.57	Prebarrenado	Residual de Migmatita			4.1
25	ADC-2	SABANETA 4	0.20	26.00	120	12.14	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita - Roca meteorizada	12.1	120	7.8
6	3091	SABANETA 2	0.15	15.50	50	4.15	Prebarrenado	Residual de Migmatita	5.7	130	2.0
7	3091		0.15	15.50	50	8.30	Prebarrenado	Residual de Migmatita			4.0
8	3091		0.15	15.50	50	5.53	Prebarrenado	Residual de Migmatita			2.6
9	3091		0.15	15.50	50	5.53	Autoperforante	Residual de Migmatita			2.6
10	3091		0.15	15.50	50	4.77	Autoperforante	Residual de Migmatita			2.3
11	3091		0.15	15.50	50	5.71	Autoperforante	Residual de Migmatita			2.7
16	3114	SABANETA 3	0.11	15.00	145	6.85	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita	7.4	145	2.5
17	3114		0.11	15.00	145	7.61	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita			2.7
18	3114		0.11	15.00	145	7.61	Prebarrenado	Saprolito de Migmatita			2.7
21	3144	RIONEGRO 2	0.11	18.00	50	5.55	Autoperforante	Saprolito de Batolito	5.7	50	2.0
22	3144		0.11	15.00	50	6.66	Autoperforante	Saprolito de Batolito			2.4
23	3144		0.11	15.00	50	4.95	Autoperforante	Saprolito de Batolito			1.8
24	ADC-1	RIONEGRO 3	0.20	15.00	50	3.13	Prebarrenado	Saprolito de Batolito	3.1	50	2.0
14	3110	MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 1	0.31	7.00	14	2.45	Prebarrenado	Residual Batolito	2.4	14	2.3

Información de proyecto			D (m)	L (m)	Pi (PSI)	Prueba de Carga $f=P/A=f(t/m^2)$	Tipo de MP	Suelo	Prueba de Carga promedio $f=P/A=f(t/m^2)$	Pi Construcción (PSI)	Carga (t/m)
ID Proyecto											
19	3135	MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 2	0.20	9.00	50	4.20	Prebarrenado	Residual de Batolito	4.2	50	2.6
20	3136	MEDELLÍN ALTO DE LAS PALMAS 3	0.20	9.00	50	8.75	Prebarrenado	Saprolito y roca meteorizada de Batolito	8.8	50	5.4
15	3113	RIONEGRO 1	0.11	15.00	130	12.38	Autoperforante	Roca de batolito	12.4	130	4.4
12	3106	RIONEGRO	0.13	6.50	130	7.36	Prebarrenado	Lleno	7.4	130	2.9
13	3106		0.13	6.50	130	7.36	Prebarrenado	Lleno			2.9

Tabla 27. Rozamiento unitario vs presión de inyección por perfil de suelo

Tipo de Suelo	Rozamiento Unitario (PSI)	Presión de inyección (PSI)	Rozamiento Unitario (Mpa)	Presión de inyección (Mpa)
Saprolito de Migmatita	13,3	130	0,09	0,91
Saprolito de Migmatita	13,3	130	0,09	0,91
Saprolito de Migmatita	15,8	130	0,11	0,91
Saprolito de Migmatita	11,6	130	0,08	0,91
Saprolito de Migmatita	12,2	130	0,09	0,91
Saprolito de Batolito	4,4	50	0,03	0,35
Saprolito de Batolito	7,9	50	0,06	0,35
Saprolito de Batolito	9,5	50	0,07	0,35
Saprolito de Batolito	7,0	50	0,05	0,35
Saprolito de Migmatita	9,7	145	0,07	1,02
Saprolito de Migmatita	10,8	145	0,08	1,02
Saprolito de Migmatita	10,8	145	0,08	1,02
Saprolito de Batolito	12,4	50	0,09	0,35
Roca de batolito	17,6	130	0,12	0,91
Saprolito de Migmatita	17,3	120	0,12	0,84
Residual de Migmatita	5,9	130	0,04	0,91
Residual de Migmatita	11,8	130	0,08	0,91
Residual de Migmatita	7,9	130	0,06	0,91
Residual de Migmatita	7,9	130	0,06	0,91
Residual de Migmatita	6,8	130	0,05	0,91
Residual de Migmatita	8,1	130	0,06	0,91
Residual de Batolito	6,0	50	0,04	0,35
Residual Batolito	3,5	14	0,02	0,10
Lleno	10,5	130	0,07	0,91
Lleno	10,5	130	0,07	0,91

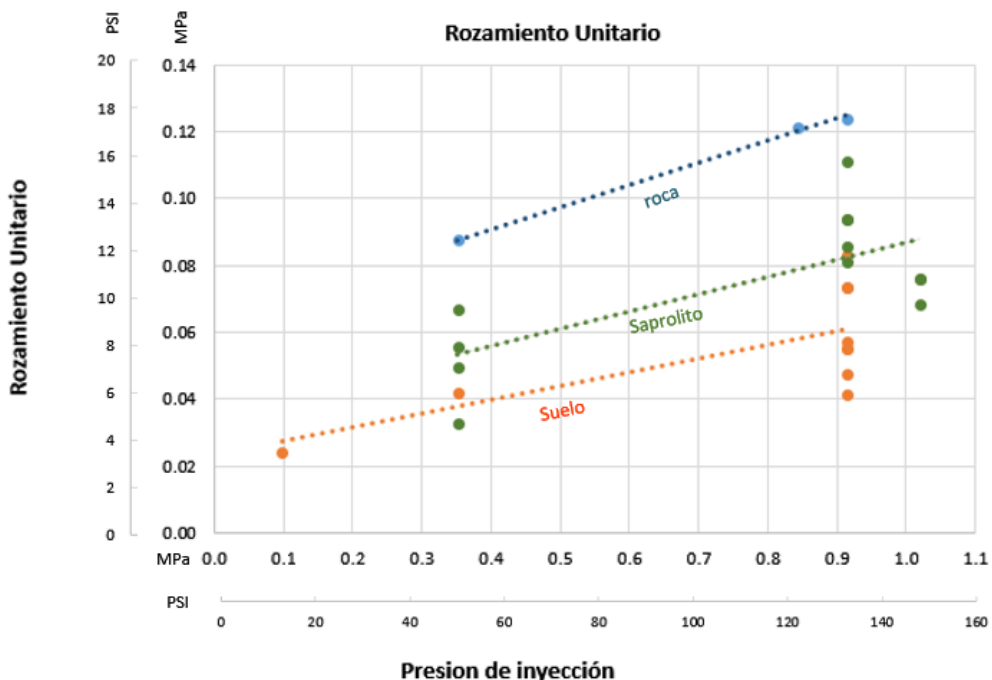


Figura 34. Abaco de rozamiento unitario vs presión de inyección por perfil de suelo

En la Tabla 27 y Figura 34 se muestran valores de rozamiento unitario y presión de inyección para diferentes tipos de suelo según su estado de meteorización.

La Figura 34 presenta una interpolación de datos como propuesta para cálculo estimación de rozamiento unitario a partir de presiones de inyección que puedan ser conseguidas efectivamente durante el proceso de construcción.

En la Figura 35 se observa la capacidad de carga promedio por metro lineal de acuerdo al perfil de suelo según su estado de meteorización en los terrenos objetos de este estudio como migmatita y batolito.

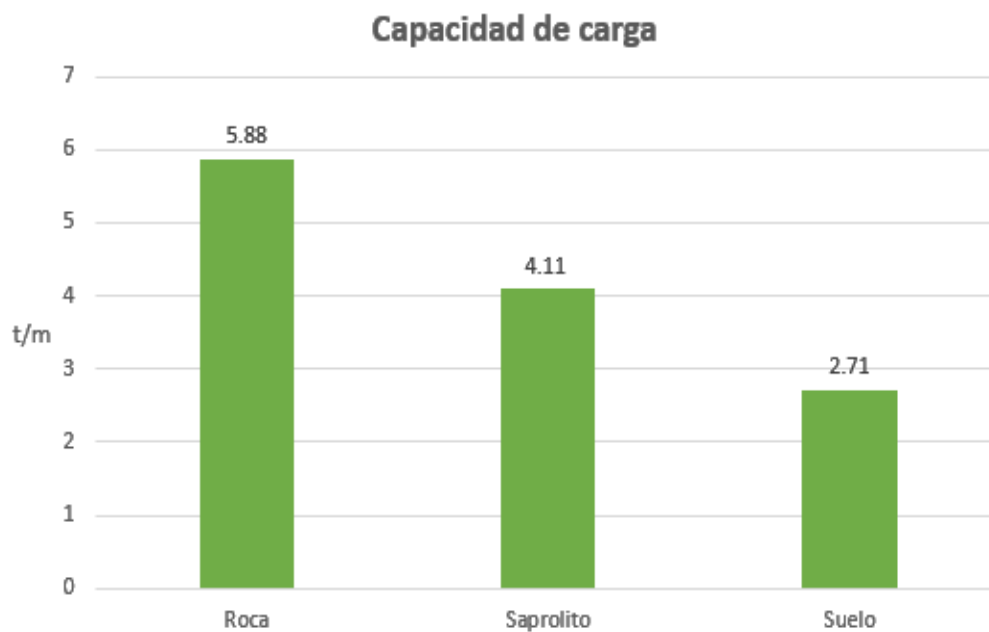


Figura 35. Capacidad de carga promedio por metro lineal en perfil de suelo según meteorización (migmatita y batolito)

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología desarrollada en esta investigación propone la creación de un factor de corrección de la desviación FCD aplicado únicamente sobre la metodología de cálculo de capacidad portante que mejores ajustes presentó (La Guía Española). Este factor de corrección se aplica al índice de desviación definido anteriormente como:

$$\frac{P_{prueba}}{P_{teórico}} = \varepsilon \text{ índice de desviación}$$

La media geométrica de todos los valores de ε define el parámetro $\mu_{\varepsilon GE}$ que es usado en la siguiente ecuación:

$$FCD = \frac{1}{\mu_{\varepsilon GE}}$$

Donde $\mu_{\varepsilon GE} = 1.15$ Según la Tabla 28

Entonces $FCD = \frac{1}{1.15} = 0.87$

Tabla 28. Parámetros estadísticos del Índice de desviación ε

	Índice de Desviación; $\varepsilon = \text{Teórico/Prueba}$		
	ε_B (Bustamante)	ε_{GE} (Guía Española)	ε_{FHWA} (Federal Highway Administration)
MEDIA (μ)	3.57	1.15	2.04
DESVIACIÓN ESTANDAR (σ)	1.23	0.34	1.27

Es notable que la metodología de la Guía Española también arroja el menor valor promedio de desviación estándar para los índices de desviación ε que es $\sigma_{\varepsilon GE} = 0.34$.

Adicionalmente, este trabajo propone calcular un valor de carga última propio (P_{CL}) después de haber calculado la carga última con el uso de la metodología de la Guía Española multiplicándola por el factor de corrección de la desviación como se muestra en la siguiente ecuación.

$$P_{UCL} = FCD * P_{UGE}$$

Con base en los resultados obtenidos de la aplicación de las metodologías de cálculo revisadas y teniendo en cuenta las prácticas comunes de caracterización geotécnica en el medio local usadas para los diferentes proyectos en los cuales se usaron los micropilotes como opción para atender cargas de compresión, se presenta a continuación una metodología para el predimensionamiento de estos micropilotes, la cual es una combinación de una metodología para corregir el ensayo STP (González, 1999), junto con la metodología de cálculo que más se ajustó a las pruebas de carga (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2005), aplicando las recomendaciones de la (FHWA, Micropile Design and Construction, 2005).

El valor final de la capacidad a compresión, es modificado por un factor que relaciona la cercanía de la metodología de diseño con las pruebas de carga, acorde con el factor de seguridad propuesto en la norma Colombiana NSR-10.

Las actividades principales y secundarias para el diseño se listan a continuación, así como una breve descripción de las actividades principales. Se debe entender que cada proyecto tiene sus propias restricciones y condiciones particulares, las cuales deben ser atendidas en el diseño propuesto.

1. Identificar los requerimientos y la factibilidad de usar micropilotes
2. Revisar la información disponible y ejecutar la exploración de campo y laboratorio
3. Determinar las cargas muerta, viva normal y viva máxima
4. Con base en la información recopilada y producida, determinar un perfil geológico – geotécnico
5. Realizar un diseño preliminar (diámetro, longitud y separación)
6. Evaluar la capacidad geotécnica del micropilote
7. Estimar el asentamiento del grupo de micropilotes(*)
8. Analizar si el diseño preliminar cumple con los requerimientos
9. Realizar recomendaciones de pruebas de carga
10. Preparar esquemas y especificaciones(*)

() Estas actividades no se consideran en el alcance de la presente investigación, sin embargo, son básicas y necesarias en el diseño geotécnico de los micropilotes.*

6.1. IDENTIFICAR LOS REQUERIMIENTOS Y LA FACTIBILIDAD DE USAR MICROPILOTES

Se deben considerar varios tipos de fundaciones y seleccionar la alternativa óptima con base en las cargas a atender, las condiciones del subsuelo y el costo.

Recomendaciones sobre el tipo de cimentación a usar se pueden encontrar en (FHWA, Design and Construction of Driven Pile Foundations, 2005).

Al analizar la factibilidad de micropilotes, estos se deben comparar con pilas excavadas, generalmente, el uso de pilas tiene una mejor relación costo/beneficio que los micropilotes, por lo tanto el uso de micropilotes estará limitado a proyectos con restricciones que hagan la construcción de pilas difícil o imposible.

Así mismo, se debe tener en cuenta que la capacidad de los micropilotes tiende a aumentar conforme se depuran y mejoran los procedimientos constructivos. Actualmente, en el medio se han reportado micropilotes que resistieron cargas de 200 t aproximadamente.

6.2. REVISAR LA INFORMACIÓN DISPONIBLE Y EJECUTAR LA EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO

La exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio, se deben ejecutar con base en las normas vigentes, de preferencia cumpliendo con los requerimientos del Título H de norma NSR-10.

En general, se deben determinar todos los datos geotécnicos, especialmente las características mecánicas de los materiales, así, es mandatorio realizar ensayos de campo (SPT) o de laboratorio (corte directo, triaxial, etc) que permitan definir un criterio de falla de todos materiales que hacen parte del subsuelo.

6.3. DETERMINAR LAS CARGAS MUERTA, VIVA NORMAL Y VIVA MÁXIMA

El análisis de cargas debe realizarse con base en el Título B de la norma NSR-10, normalmente, estas cargas son determinadas como parte del diseño estructural del proyecto.

Es importante anotar que, se deben considerar todas las cargas (compresión, tensión, laterales como sismo y/o viento, etc) y los micropilotes o el sistema combinado de fundación debe resistir todas las cargas. Las recomendaciones de esta metodología sólo incluye la revisión ante cargas de compresión.

6.4. DETERMINAR PERFIL GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

Con base en la información recopilada, se debe determinar un perfil geológico – geotécnico, el cual incluya como mínimo:

- Espesor y profundidad de los diferentes estratos identificados
- Descripción geológica (origen) y clasificación (SUCS) de los estratos identificados
- Posición del nivel freático y de ser posible su variación estacional

- Parámetros mecánicos bien sea corrigiendo el ensayo de campo SPT por una metodología aceptada (González, 1999) o con base en resultados de ensayos que midan la resistencia al corte del suelo (corte directo, triaxial, etc)
- Es importante que el perfil tenga en cuenta la cota del terreno final. Generalmente, se debe modificar el perfil determinado en la etapa de exploración e incluir los cortes y/o llenos ejecutados en obra. En el caso de llenos, se deben determinar igualmente los parámetros mecánicos.

6.5. REALIZAR UN DISEÑO PRELIMINAR

6.5.1. Separación

Para todos los casos, la separación centro a centro entre micropilotes individuales deben ser por lo menos tres (3) diámetros del micropilote. Este criterio, aunque es de pilas, reduce los efectos de grupo por micropilotes adyacentes. La separación también dependerá, de las condiciones para el uso de los micropilotes, por ejemplo cuando se usan para reforzar la capacidad de zapatas existentes.

6.5.2. Longitud

La longitud total de un elemento individual será la que permita desarrollar la capacidad geotécnica requerida, para las cargas determinadas.

Aunque los equipos de perforación locales pueden manejar altas profundidades (≈ 100 m), los equipos de inyección imponen generalmente la condición de trabajo. Más aún, para la mayoría de los casos prácticos, el límite de longitud se encuentra alrededor de los 30 m.

6.5.3. Sección

En general, la sección estará gobernada por la capacidad axial del elemento (diseño estructural), cuando se requiere atender cargas laterales y momentos, es común encontrarse con tuberías de revestimiento trabajando junto con las barras de refuerzo. Lo anterior condiciona los diámetros de trabajo.

Normalmente, para este tipo de elementos los diámetros de trabajo varían entre 4" (10.16 cm) a 8" (20.32 cm), siendo más común los elementos de 6" (15.24 cm).

6.5.4. Tipo de inyección

Teniendo en cuenta los equipos y procesos constructivos disponibles, se debe proponer un procedimiento básico de inyección que incluya la presión de trabajo mínima, normalmente, se

refiere a un tipo de micropilote según los descritos en (FHWA, Design and Construction of Driven Pile Foundations, 2005).

6.6. EVALUAR LA CAPACIDAD GEOTÉCNICA DEL MICROPILOTE

Como se determinó en el análisis de resultados, la metodología que más se ajusta a los resultados locales es la propuesta en (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2005).

Al aplicar la metodología propuesta, se obtiene la capacidad última del micropilote P_{UGE} .

6.7. APLICAR LA METODOLOGÍA PRESENTE DE FCD PARA ENCONTRAR P_{CL}

$$P_{UCL} = FCD * P_{UGE}$$

$$P_{UCL} = 0.87 * P_{UGE}$$

Finalmente al aplicar el factor de seguridad definido en H.4.7-1 según sea el caso, se obtiene la capacidad admisible, la cual es igual a la carga de diseño del elemento.

6.8. ESTIMAR EL ASENTAMIENTO DEL GRUPO DEL GRUPO DE MICROPILOTES

Debido a que en pocas ocasiones trabajará un micropilote de manera aislada, en general se tendrán grupos de micropilotes trabajando de manera solidaria. De ese modo, se hace necesario estimar el asentamiento ante las cargas de trabajo.

Para esto conviene seguir los procedimientos que se presentan en (FHWA, Micropile Design and Construction, 2005) o (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2005). Cuando se estime el asentamiento del grupo, generalmente se desprecia el trabajo de la losa de fundación, sin embargo, si se realizan cálculos de interacción, es posible incluir el trabajo de la losa en el sistema de fundación.

6.9. ANALIZAR SI EL DISEÑO PRELIMINAR CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS

Una vez determinada la capacidad admisible, esta deberá ser mayor o igual a las solicitaciones a compresión, según el análisis de cargas. Igualmente, los asentamientos tanto

puntuales como diferenciales deberán ser menores a valores que aseguren un buen comportamiento estructural y funcional del proyecto.

De no cumplirse los criterios anteriores, se deberá modificar el diseño, dependiendo de las condiciones del subsuelo, convendrá más modificar el diámetro o la longitud de los elementos. Con base en los criterios analizados, la recomendación generalizada es poner menos elementos de alta capacidad, en contraste con un número elevado de micropilotes con una capacidad media.

6.10. REALIZAR RECOMENDACIONES DE PRUEBAS DE CARGA

En general, al implementar en obra elementos inyectados, estos deben probarse mediante procedimientos aceptados, en general se deben tener en cuenta las recomendaciones que se presentan en (FHWA, Design and Construction of Driven Pile Foundations, 2005), se debe buscar en proyectos de categoría Alta y Especial según la NSR-10, ejecutar por lo menos una (1) prueba de tipo verificación, y para todos los proyectos en los cuales se usen estos elementos, ejecutar por lo menos una (1) prueba

Se debe tener en cuenta que las pruebas de cargas tipo verificación o “Verification Test” (FHWA, Design and Construction of Driven Pile Foundations, 2005), se deben llevar hasta un valor igual a la carga de diseño multiplicado por el factor de seguridad adoptado.

Es importante anotar que las cargas utilizadas en las pruebas, no deben exceder el 80% de la capacidad estructural del micropilote.

Se debe tener en cuenta que según H.4.7-2, si se cumplen los requisitos dispuestos es posible reducir el factor de seguridad aplicado a la carga última, así mismo se modifica la carga a la cual se deben ejecutar las pruebas tipo verificación.

6.11. PREPARAR ESQUEMAS Y ESPECIFICACIONES

Cuando el diseño geotécnico se haya finalizado, se deben entregar esquemas claros donde se especifiquen los datos del diseño, tales como longitud, diámetro, tipo de inyección, estrato portante, etc. Así mismo, deben quedar claras las especificaciones y los procedimientos en campo que se deben seguir para probar el micropilote.

CAPÍTULO 7. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PROPUESTA

Se presenta un ejemplo para la aplicación del método propuesto con los datos del proyecto 3114 ubicado en el municipio de Sabaneta, Antioquia, específicamente el micropilote MP P17.

Se desarrollan entonces, los pasos recomendados en la metodología propuesta.

7.1. IDENTIFICAR LOS REQUERIMIENTOS Y LA FACTIBILIDAD DE USAR MICROPILOTES

Dadas las características de cimentación del proyecto (losa de fundación), se determinó que se necesitaban pilotes de fricción como ayuda al control de asentamientos. El proyecto cuenta con los accesos y los requerimientos técnicos para los equipos de construcción, por tanto se hace viable el uso de los elementos.

7.2. REVISAR LA INFORMACIÓN DISPONIBLE Y EJECUTAR LA EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO

Para esta zona se contaban con los estudios regionales y locales de Microzonificación, partiendo de este y con los lineamientos de la NSR-10 se determinó ejecutar cuatro (4) perforaciones de tipo mecánico manual con equipo para S.P.T. La mitad de estas se llevó hasta una profundidad de 25m, en razón a la categoría del proyecto.

Cerca de la zona donde se proyecta el micropilote, se ejecutó una perforación, la cual se presenta en la Figura 36, además en esta se identificó la posición del nivel freático a 6 m de la superficie.

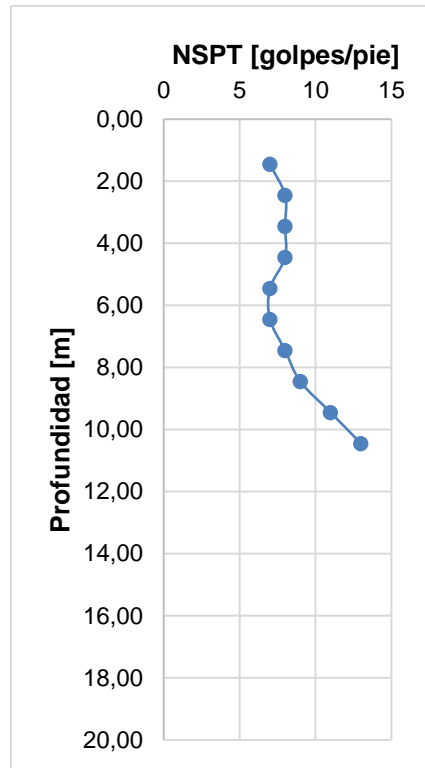


Figura 36. Perforación con ensayo SPT

En cada una de las perforaciones, se tomaron muestras remoldeadas e inalteradas con tubo shelby, estándar y bolsa plástica, garantizando por tanto la representatividad total de los estratos detectados.

Con el fin de determinar las condiciones geotécnicas del sitio del proyecto, se llevaron a cabo los trabajos de exploración, muestreo y ensayos in situ del subsuelo, de acuerdo a las normas ASTM vigentes.

Los materiales explorados corresponden a suelos de tipo cohesivo. Donde se apoyarán las estructuras proyectada, los suelos no presentan dispersión considerable en las condiciones físico mecánicas, se clasifican MH, SM y CL según los criterios de la Clasificación Unificada de los Suelos U.S.C.

7.3. DETERMINAR LAS CARGAS MUERTA, VIVA NORMAL Y VIVA MÁXIMA

Dado que estos pilotes se necesitan para control de asentamientos, sólo se tuvo como requerimiento de diseño que soportaron por lo menos unas 40 t de carga última.

7.4. DETERMINAR PERFIL GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

Con base en la información recopilada, y específicamente la perforación aledaña a la zona donde se proyecta el micropilote MP P17, se construyó el siguiente perfil básico:

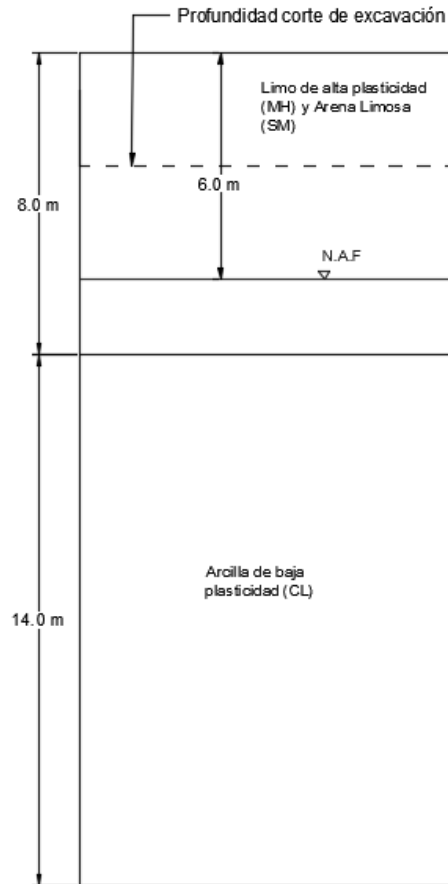


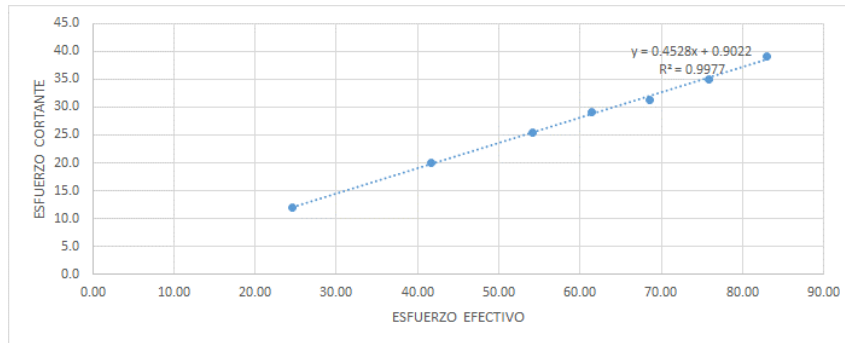
Figura 37. Perfil básico prediseño

Para los materiales identificados, se aplicó la corrección del ensayo de penetración estándar por la metodología de (González, 1999). El tratamiento de datos se presenta en la Tabla 29.

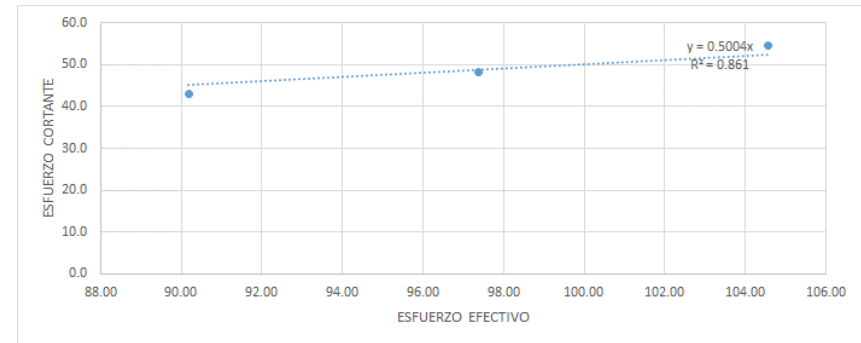
Tabla 29. Corrección de NSPT según (González, 1999)

ENSAYO	PROFUNDIDAD (m)	N (N/Pie)	Y _h (kN/m ³)	σ	U	σ _{v'} (kPa)	η ₂	η ₃	η ₄	Rs (σ _{v'} /p _a)	Cn S.I.	Cn G.	N _{corr} =N ₁	N ₄₅	N ₆₀	N ₇₀	Φ _{equi} (°)	T (kPa)
				[kPa]	[kPa]													
1	1.45	7	17.00	24.65	0	24.65	0.75	1	1	0.26	1.83	1.59	13	10	7	6	26	12.0
2	2.45	8	17.00	41.65	0	41.65	0.75	1	1	0.43	1.51	1.36	12	9	7	6	26	20.0
3	3.45	8	17.00	58.65	4.4145	54.24	0.75	1	1	0.57	1.35	1.25	11	8	6	5	25	25.4
4	4.45	8	17.00	75.65	14.2245	61.43	0.85	1	1	0.64	1.27	1.19	10	9	6	6	25	29.2
5	5.45	7	17.00	92.65	24.0345	68.62	0.85	1	1	0.72	1.20	1.14	8	7	5	5	24	31.2
6	6.45	7	17.00	109.65	33.8445	75.81	0.95	1	1	0.79	1.14	1.10	8	8	6	5	25	34.9
7	7.45	8	17.00	126.65	43.6545	83.00	0.95	1	1	0.87	1.09	1.06	9	8	6	5	25	39.0
8	8.45	9	17.00	143.65	53.4645	90.19	0.95	1	1	0.94	1.04	1.03	9	9	7	6	26	43.1
9	9.45	11	17.00	160.65	63.2745	97.38	0.95	1	1	1.02	0.99	0.99	11	10	8	7	26	48.3
10	10.45	13	17.00	177.65	73.0845	104.57	1.00	1	1	1.09	0.96	0.96	13	13	9	8	28	54.5

Con los valores corregidos, se realizan las gráficas σ vs τ y se determinan los parámetros de resistencia. El resultado se presenta en la Figura 43.



Suelo residual IB



Suelo residual IC

Figura 38. Gráficas para determinar parámetros según (González, 1999)

Determinados los parámetros y teniendo en cuenta una profundidad de corte de 3 m, en la Figura 39- se presenta el perfil de diseño geológico – geotécnico.

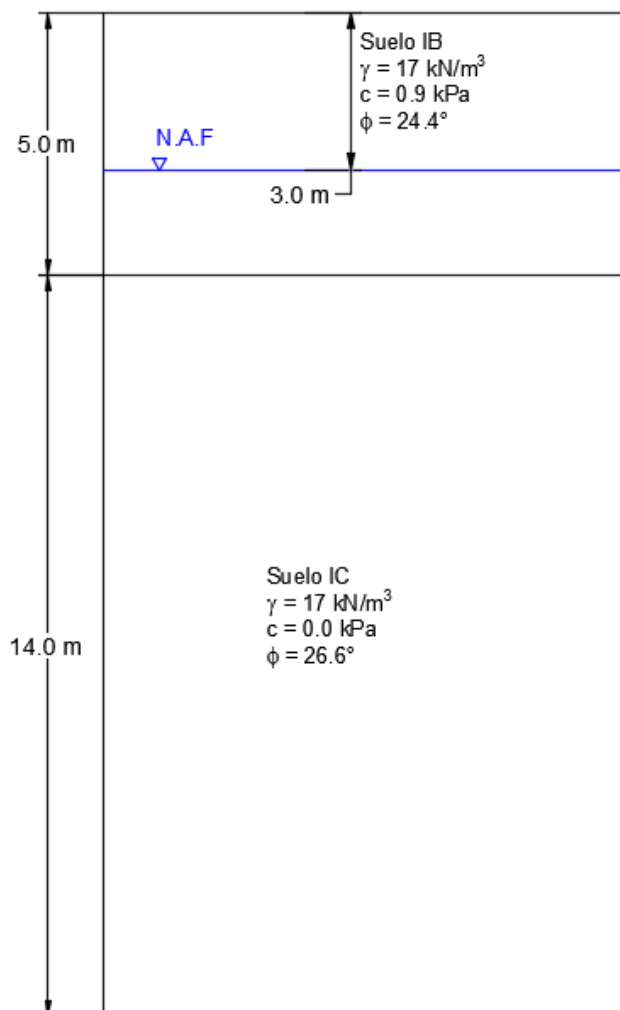


Figura 39. Perfil de diseño geológico geotécnico

7.5. REALIZAR UN DISEÑO PRELIMINAR

Dadas las características del proyecto y los equipos disponibles, se plantea un prediseño de elementos con un diámetro de 4.5 "(0.114 m) y una longitud de 15 m procurando que los elementos queden en el estrato identificado como suelo IC.

Así mismo, para lograr la capacidad necesitada se propone usar una inyección tipo IRS sobre toda la longitud del elemento.

7.6. EVALUAR LA CAPACIDAD GEOTÉCNICA DEL MICROPILOTE

Aplicando lo expuesto en el numeral 6.6 de este documento, se aplicará la metodología presentada en (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2005), con la

salvedad que no se aplicarán los coeficientes de reducción del ángulo de rozamiento y cohesión, esto con el fin de obtener la capacidad última.

En la Tabla 30 se presenta la aplicación de la metodología

Tabla 30. Cálculo capacidad a compresión

Proyecto		3114 PINARES DEL CARMELO	F _c		1.0	IU			
ID	Micropilote MP.P-17	F _t		1.0	IR				
Ltotal [m]	15.0	A _u [m ²]		0.36	IRS		Σ		
Llibre [m]	0.0						R _{co,d} [kN]	69.2	
Lsubo [m]	15.0						R _{co,d} [kN]	461.6	
D _o [m]	0.114								
NF [m]	3.0								
Tipo Inyección	IRS							P [t]	47.1

Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{inj} [psi]	P _{inj} [kPa]	α _{ij} ' [kPa]	r _{co,d} (z) [kPa]	R _{co,d} [kN]
1	Suelos Residual	0.00-5.00	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.9	24.4	145	999.7	0.0	0.9	0.3
			1.0	1.0	17.0	17.0	0.0	17.0	0.9	24.4	145	999.7	10.0	3.8	1.4
			2.0	2.0	17.0	34.0	0.0	34.0	0.9	24.4	145	999.7	20.0	6.7	2.4
			3.0	3.0	17.0	51.0	0.0	51.0	0.9	24.4	145	999.7	29.9	9.6	3.5
			4.0	4.0	17.0	68.0	9.8	58.2	0.9	24.4	145	999.7	34.2	10.9	3.9
			5.0	5.0	17.0	85.0	19.6	65.4	0.9	24.4	145	999.7	38.4	12.1	4.3
2	Suelos Residual	5.00-21.0	6.0	6.0	17.0	102.0	29.4	72.6	0.0	24.4	145	999.7	375.9	109.7	39.4
			7.0	7.0	17.0	119.0	39.2	79.8	0.0	26.6	145	999.7	377.3	120.7	43.3
			8.0	8.0	17.0	136.0	49.0	87.0	0.0	26.6	145	999.7	381.3	121.9	43.8
			9.0	9.0	17.0	153.0	58.8	94.2	0.0	26.6	145	999.7	385.3	123.2	44.2
			10.0	10.0	17.0	170.0	68.6	101.4	0.0	26.6	145	999.7	389.2	124.5	44.7
			11.0	11.0	17.0	187.0	78.4	108.6	0.0	26.6	145	999.7	393.2	125.7	45.2
			12.0	12.0	17.0	204.0	88.2	115.8	0.0	26.6	145	999.7	397.2	127.0	45.6
			13.0	13.0	17.0	221.0	98.0	123.0	0.0	26.6	145	999.7	401.2	128.3	46.1
			14.0	14.0	17.0	238.0	107.8	130.2	0.0	26.6	145	999.7	405.1	129.6	46.5
			15.0	15.0	17.0	255.0	117.6	137.4	0.0	26.6	145	999.7	409.1	130.8	47.0

De ese modo, la capacidad última del micropilote es aproximadamente 47.1 t, usando presiones de inyección mínimas de 145 psi.

7.7. APLICAR LA METODOLOGÍA PRESENTE DE FCD PARA ENCONTRAR P_{U CL}

$$P_{U CL} = FCD * P_{UGE}$$

$$P_{U CL} = 0.87 * 47.1 t = 41 t$$

Finalmente al aplicar el factor de seguridad definido en H.4.7-1 según sea el caso, se obtiene la capacidad admisible, la cual es igual a la carga de diseño del elemento.

Factor de seguridad de 2.0 para los casos de edificaciones bajas que no apliquen reducción por carga vida y cumpliendo la cantidad de pruebas de carga.

$$P_{A CL} = \frac{41 t}{2} = 20.5 t$$

7.8. ESTIMAR EL ASENTAMIENTO DEL GRUPO DEL GRUPO DE MICROPILOTES

Este análisis aunque necesario, como se explicó se encuentra por fuera del alcance del presente trabajo.

7.9. ANALIZAR SI EL DISEÑO PRELIMINAR CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS

De la Tabla 30, podemos ver que la capacidad última calculada es del orden de 41 t, la cual es mayor a las 40.0 t requeridas por las características del proyecto. Por tanto, se valida el prediseño.

7.10. REALIZAR RECOMENDACIONES DE PRUEBAS DE CARGA

La recomendación básica es ejecutar pruebas tipo “Proff Test” (FHWA, Design and Construction of Driven Pile Foundations, 2005), dado que está evaluando para trabajar en condiciones últimas (control de asentamientos), las pruebas se deberán llevar hasta por lo menos las 47 t estimadas de capacidad.

7.10.1. Resultado prueba de carga

Para este elemento, en la Figura 40 se presenta el resultado de la prueba de carga.

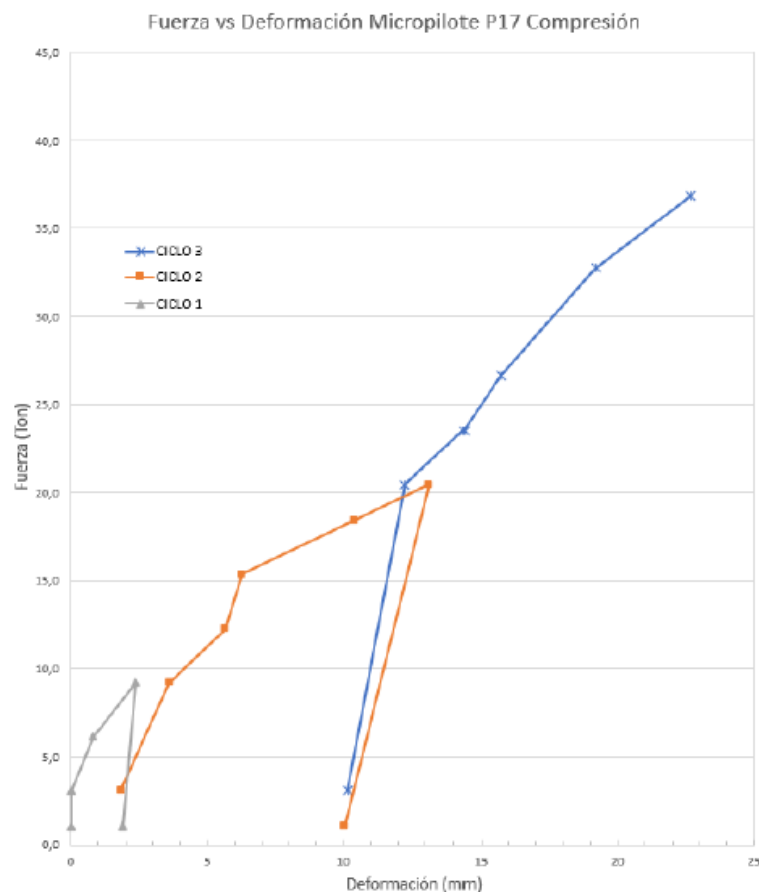


Figura 40. Prueba de carga. Deformación vs Fuerza

De la prueba de carga se tiene que la capacidad del micropilote es de 36.7 t la cual es similar a la estimada mediante la metodología propuesta. Sin embargo, este es el valor a tener en cuenta.

En este punto convendría modificar el diseño, o aumentar el número de elementos para compensar la capacidad real del elemento frente a la exigencia de diseño.

7.11. PREPARAR ESQUEMAS Y ESPECIFICACIONES

Este paso, aunque necesario, como se explicó anteriormente se encuentra por fuera del alcance del presente trabajo.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8.1. CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo de investigación fue posible establecer las siguientes conclusiones:

- La metodología de la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) fue la más ajustada y se sugiere que pueda ser aplicada en el pre-dimensionamiento de micropilotes en suelos locales dado que se encuentra el ϵ índice de desviación más cercano a la unidad.
- Con la información recopilada y analizada en esta investigación fue posible aportar valores promedios de capacidad de carga por metro lineal para pre-dimensionamiento de micropilotes en zonas con condiciones y localizaciones similares a las tenidas en cuenta acá. Para rocas batolito y migmatita se puede trabajar con 5.88 t/m, mientras que para saprolito y suelo residual de las mismas formaciones es posible asumir 4.11 t/m y 2.71 t/m respectivamente.
- Se aporta un ábaco para encontrar factor de rozamiento unitario a partir de las presiones de inyección en suelos locales con las limitaciones que ofrece nuestro medio.
- Los valores para ángulo de fricción interna y cohesión de los suelos involucrados en todos los micropilotes del presente proyecto de investigación fueron encontrados a partir de ensayo SPT usando las correlaciones de González G, A. 1999, lo cual es usual en proyectos en los cuales no existen disponibles resultados de ensayos mecánicos como corte directo o compresión triaxial. De esta forma se afirma que bajo poca información geotécnica una combinación de la correlación de González G, A. 1999, y la Guía Española podrían de gran utilidad para predimensionar micropilotes en la zona de estudio.
- Los siguientes objetivos específicos propuestos al principio de la investigación fueron cumplidos:

- Recopilar y revisar procedimientos y resultados de pruebas de carga de algunos micropilotes perforados.
 - Se recopilaron 28 resultados de pruebas de carga, sin embargo fue posible analizar solo 25 puesto que los del proyecto 3088 no pudieron correlacionarse con estudio de suelos por ausencia del mismo.
- Realizar una evaluación comparativa entre los resultados de las pruebas de carga sobre micropilotes perforados y los valores esperados de capacidad de carga según las metodologías analíticas usadas.
- Plantear factores de seguridad para la capacidad de micropilotes con base en los resultados obtenidos.
- Aportar una metodología sencilla y práctica para estimar capacidad de carga de un micropilote en proyectos de muy poca información geotécnica básica, a partir de correlaciones de ensayo SPT y tres metodologías de diseño de micropilotes.
 - En esta investigación se plantea el parámetro ϵ nombrado índice de desviación que es el cociente entre la carga última del ensayo de prueba de carga y la carga última según la metodología analítica, que de manera sencilla plantea el uso de la metodología Española para pre-dimensionar micropilotes y estimar su capacidad de carga axial dentro de las limitaciones de tipo de suelo.
- Definir cuál metodología se ajusta de mejor manera a los proyectos analizados teniendo en cuenta la información geotécnica disponible.
 - En este documento se analizó y definió que la metodología que mayor ajuste general tuvo a los resultados de prueba de carga fue la Guía española

8.2. LIMITACIONES

- Se incluyeron en la investigación micropilotes con diámetros de perforación entre 12 cm y 30 cm; y longitudes entre 6 m y 26 m.
- El rango de presiones de inyección fue grande y cubrió prácticamente todo el espectro constructivamente posible, sin embargo, no fue objeto de profundización de esta investigación la influencia de dicha presión de inyección sobre los factores de adherencia.
- No se estudió el comportamiento de las curvas de esfuerzo vs deformación.

8.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se proponen hacia el futuro abrir e implementar algunas líneas de investigación como las siguientes:

- Estudio de los resultados y ajustes en capacidades de micropilotes prebarrenados y autoperforantes de manera separada y en profundidad.
- Estudio de las condiciones geotécnicas locales la variabilidad de la resistencia friccional en micropilotes autoperforantes y prebarrenados, parametrizando las presiones de inyección y obtener curvas o ábacos locales para definir con mayor precisión los factores de adherencia.
- Mejora de la capacidad portante por camisa de acero en cabeza de micropilotes autoperforantes con barra hueca. Esta camisa de acero en la cabeza normalmente se instala para atender cargas laterales y momentos. Esta técnica se ha implementado en algunos proyectos con unos rendimientos notablemente mayores a pre-barrenados. Se quiere investigar la interacción suelo - estructura y el aporte de tal camisa de acero como cabeza de micropilote a la capacidad de carga axial a compresión. Se plantea también que la inclusión de una camisa lisa de acero en los primeros metros del micropilote puede afectar la capacidad de carga friccional del mismo.
- Pruebas de carga a compresión axial sobre grupos de micropilotes. Existe localmente una importante cantidad de pruebas de carga sobre micropilotes individuales independientemente de la compañía o instituto que las ejecute, sin embargo no se encuentra información suficiente sobre pruebas de grupos de micropilotes. Se

propone ampliar la investigación en este campo para definir el comportamiento y eficiencia grupal y definir los equipos de prueba necesarios y disponibles.

- Pruebas de carga lateral sobre micropilotes individuales o grupos de micropilotes. Esta investigación evidenció gran falta o ausencia total de la práctica de ejecutar ensayos de carga lateral tanto sobre micropilotes individuales como sobre grupos de micropilotes. La mayoría de los micropilotes conocidos en el medio carecen de refuerzo a cortante en la cabeza, por lo cual se evidenciaron fallas por pandeo en los primeros metros de elementos además por ser de sección reducida (hasta 20 cm de diámetro). También se desconoce el real comportamiento de interacción de grupos de micropilotes con dado o zapata de unión entre ellos.
- Correlación de rozamiento unitario en función de la velocidad de onda de sismo.

ANEXO 1. RESUMEN DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE PROYECTOS.

Para estandarizar la información que alimenta los modelos, se estableció para cada proyecto un perfil geotécnico base que muestra la estratigrafía (Deere y Patton. 1971), parámetros geotécnicos, SPT, clasificación unificada de los suelos, correlaciones y correcciones de SPT (Clayton. 1995). Los valores para ángulo de fricción interna y cohesión fueron encontradas usando las correlaciones de González G, A. 1999.

A continuación se presenta información de cada proyecto en los cuales se logró establecer el perfil geotécnico base y en los cuales la información fue insuficiente.

PROYECTO 3088

De este proyecto se obtuvo muy poca información base de estudio geotécnico y sólo se contó con registro de perforación de un sitio distante 300 metros, por lo cual no pudo ingresarse en el análisis.

Propiedades índice y físico mecánicas de los suelos

Con base en los sondeos realizados, y junto con la información obtenida de los ensayos de laboratorio, se concluye que la zona en general presenta una estratigrafía muy uniforme la cual se puede expresar de la siguiente manera:

- 0.00 m – 1.00 m: Depósito Aluvial
Sedimentos gris claro, motas blancas y negras, humedad baja, tamaño milimétrico.
Este depósito solo se presenta el perforación P-1.
- 0.00 m –15.00 m: Suelo residual Horizonte IIB
Roca gris claro, motas blancas y negras, levemente meteorizada, con caras fracturadas y baja oxidación.

En la Tabla 31 se presenta el resumen de los resultados de laboratorio ejecutados para la caracterización mecánica de la roca.

Tabla 31. Resultados de las propiedades índice para el nivel de suelo identificado.

ESTRATO	SONDEO	PROFUNDIDAD	γ_d (g/cm ³)	Resistencia compresión simple (kg/cm ²)
IIB	P-1 M-3	6.00 - 9.00	2.60	565.56
IIB	P-2 M-1	0.20	2.58	482.82
IIB	P-2 M-1	0.60	2.58	676.90
IIB	P-2 M-1	0.90	2.56	886.57
IIB	P-3 M-2	6.00	2.56	232.91
IIB	P-3 M-4	9.00 - 12.00	2.54	384.94

Parámetros del suelo

Los parámetros de la roca se determinaron con la ayuda del software RocLab de Rocscience, utilizando como datos de entrada los resultados de la resistencia a la compresión simple sobre núcleos de roca y las observaciones realizadas en campo. El resumen se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32. Parámetros de resistencia de la roca.

ESTRATO	γ (KN/m3)	c (KN/m2)	ϕ (°)
IIB	25.6	1.088	30.2

En las perforaciones para la construcción de los micropilotes para ensayo de carga no se encontró la misma estratigrafía expresada anteriormente, por lo cual debió ser descartada.

PROYECTO 3089

Perforación		Datos Exactos del Estudio de Suelos											
Estrato	Suelo	Profundidad	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ_d [g/cm ³]	γ_{dm} [g/cm ³]	q_u [kg/cm ²]	q_{umedia} [kg/cm ²]	c [kg/cm ²]	ϕ [°]	N _{spt}	N _{sptmedio}
Suelo Residual	Limo arenoso	0.0-14.0	7,0	32.8-52.8	42.8	1.071-1.386	1.229	0.59-3.26	1,9	-	-	2-34	18
Saprolito	Arena limosa (SM)	11.0-21.0	16,0	16.0-47.3	31,7	-	-	-	-	-	-	26-57	42
Roca descompuesta		9.0-21.0	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

IC de Dann Deere

Perfil Simplificado - Interpretado											
Estrato	Suelo	Profundidad	H _i [m]	w _{media} [%]	γ_h [KN/m ³]	N _{spt}	c [KN/m ²]	ϕ [°]	p _i [Mpa]		
Suelo Residual	Fino	0.0-7.0	7,0	42.8	17,5	18	0,0	30,0	2,66		
Saprolito	Arena	7.0-16.0	9,0	31,7	18,0	42	0,0	37,0	2,66		
Roca descompuesta	Roca fracturada	16.0-30.0	14,0	-	21,0	>60	60,0	35,0	2,66		

Valores asumidos

UCS [kPa]	600
-----------	-----

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Bozbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils		Clayey soils	
N_{60} and E_{PMR}	$E_{PMR} = 1.33 \times (N_{60})^{0.77}$	$R^2 = 0.82$	$E_{PMR} = 1.61 \times (N_{60})^{0.71}$	$R^2 = 0.72$
N_{60} and p_u	$p_u = 0.33 \times (N_{60})^{0.51}$	$R^2 = 0.74$	$p_u = 0.26 \times (N_{60})^{0.57}$	$R^2 = 0.67$
E_{PMR} and p_u	$p_u = 0.36 \times (E_{PMR})^{0.59}$	$R^2 = 0.75$	$p_u = 0.20 \times (E_{PMR})^{0.76}$	$R^2 = 0.85$
p_u and s_v	-	-	$s_v = 0.35 \times (p_u - s_v)^{0.36}$	$R^2 = 0.76$
N_{60} and E_{PMR}/γ_s	Increasing trend	-	β^0 ranging from 5.5 to 15 with an average of 8	-
			No definitive trend	

Clayton (1995) provides the following relationship between the unconfined compressive strength (UCS) and the corrected SPT value (N_{60}) for weak rocks.

$$UCS \geq 10 N_{60} \text{ (kPa)} \tag{1}$$

Figura 41. Perfil geotécnico base 3089

PROYECTO 3091

Datos Exactos del Estudio de Suelos											
Estrato	Suelo	Profundidad	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _{dm} [g/cm ³]	q _u [kg/cm ²]	q _{umedia} [kg/cm ²]	N _{spt}	N _{sptmedio}
Suelo Residual	Limo arcillo (MH-SM-GC)	0.0-17.0	8.5	31.6-50.1	40.9	-	-	0.78-2.58	1.6	-	-
Saprolito	Arena limosa (SM)	8.0-19.0	13.5	19.2-28.2	23.7	-	-	-	-	33-57	45
Roca descompuesta		14.0-27.5	20.8								

IC de Dann Deere

Perfil Simplificado - Interpretado							
Estrato	Suelo	Profundidad	H _i [m]	w _{media} [%]	γ _h [kN/m ³]	N _{spt}	ρ _i [Mpa]
Suelo Residual	Fino	0.0-8.5	8.5	40.9	16.5	-	-
Saprolito	Arena	8.5-19.0	10.5	23.7	18.0	45	-
Roca descompuesta	Roca fracturada	19.0-30.0	11.0		21.0	>60	2.66

*Para la construcción del micropilote se realizó un corte de material de 5 m
Valores asumidos

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Bozbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils	Clayey soils
N ₆₀ and E _{PMT}	$E_{PMT} = 1.33 \times (N_{60})^{0.77}$ R ² = 0.82	$E_{PMT} = 1.61 \times (N_{60})^{0.71}$ R ² = 0.72
N ₆₀ and p _L	$p_L = 0.33 \times (N_{60})^{0.57}$ R ² = 0.74	$p_L = 0.26 \times (N_{60})^{0.57}$ R ² = 0.67
E _{PMT} and p _L	$p_L = 0.36 \times (E_{PMT})^{0.59}$ R ² = 0.75	$p_L = 0.20 \times (E_{PMT})^{0.58}$ R ² = 0.85
p _L and s _w	-	$s_w = 0.35 \times (p_L - p_a)^{0.36}$ R ² = 0.76 p _L ranging from 5.5 to 15 with an average of 8
N ₆₀ and E _{PMT} /p _L	Increasing trend	No definitive trend

Figura 42. Perfil geotécnico base 3091

PROYECTO 3106

Datos Exactos del Estudio de Suelos											
Estrato	Suelo	Profundidad	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _{dm} [g/cm ³]	q _u [kg/cm ²]	q _{umedia} [kg/cm ²]	N _{spt}	N _{sptmedio}
Lleno heterogéneo	Limo arcillo (MH-SM-GC)	0.0-2.50	1.3	47	47.0	-	-	-	-	04-12	8
Depósito aluvial fino	Arena limosa (SM)	2.5-6.00	4.3	10.0-50.0	30.0	-	-	-	-	04-45	25
Depósito aluvial grues	Arena limosa (SM)	6.00-8.50	7.3	10.0-50.0	30.0	-	-	-	-	25-65	45

*Se realizó un lleno de 3.5 m en el sitio luego de la exploración

Perfil Simplificado - Interpretado						
Estrato	Suelo	Profundidad	H _i [m]	w _{media} [%]	γ _h [kN/m ³]	N _{spt}
Lleno heterogéneo	Fino blando	0.0-2.0	2.0	47.0	16.5	8
Depósito aluvial fino	Fino denso	2.0-6.0	4.0	30.0	18.0	25
Depósito aluvial grues	Arena limosa	6.0-8.5	2.5	30.0	21.0	45

Valores asumidos

Figura 43. Perfil geotécnico base 3106

PROYECTO 3110

Datos Exactos del Estudio de Suelos											
Estrato	Suelo	Profundidad	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _{dm} [g/cm ³]	q _u [kg/cm ²]	q _{umedia} [kg/cm ²]	N _{spt}	N _{sptmedio}
Lleno antrópico	-	0.0-00.5	0.3	-	-	-	-	-	#¡VALOR!	1	1
Capa vegetal	-	00.5-00.8	0.4	-	-	-	-	-	-	1	1
Ceniza	-	00.8-02.0	1.0	-	-	-	-	-	-	04-05	5
Suelo residual	-	02.0-12.0	7.0	-	-	-	-	-	-	07-35	21

*Se realizó un corte de 3 m luego de la exploración

Perfil Simplificado - Interpretado						
Estrato	Suelo	Profundidad	H _i [m]	w _{media} [%]	γ _h [kN/m ³]	N _{spt}
Lleno	Fino	0.0-1.0	1.0		15.0	1
Ceniza	Fino	1.0-02.0	1.0		16.5	5
Suelo residual	Fino	02.0-12.0	10.0		17.5	21

Valores asumidos

Figura 44. Perfil geotécnico base 3110

PROYECTO 3113

Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _{dm} [g/cm ³]	q _u [kg/cm ²]	q _{umedia} [kg/cm ²]	c [kg/cm ²]	φ [°]	N _{spt}	N _{sptmedio}
Lleno	-	0.0-03.0	1,5	18	18,0	-	-	-	-	-	-	5	5
Suelo arenoso con micás	-	03.0-13.5	8,3	10.0-15.0	12,5	1,4	-	-	-	0,0	29,0	19-34	27
Suelo limo con micás	-	13.5-16.5	14,8	15.0-25.0	20,0	1,4	-	-	-	0,0	29,0	26-29	28
NF [m]	2												
*Se realizó un corte de 3 m luego de la exploración													
Perfil Simplificado - Interpretado													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _i [m]	w _{media} [%]	γ _h [kN/m ³]	N _{spt}	c [kN/m ²]	φ [°]					
Arena	Arena	0.0-12.00	12,0	12,5	16,5	27	2,0	33,0					
Limo	Fino	12.00-16.50	4,5	20,0	17,0	28	0,0	36,5					
Valores asumidos													

Figura 45. Perfil geotécnico base 3113

PROYECTO 3114

Perforación		Datos Exactos del Estudio de Suelos											
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _{dm} [g/cm ³]	q _u [kg/cm ²]	q _{umedia} [kg/cm ²]	c [kg/cm ²]	φ [°]	N _{spt}	N _{sptmedio}
Limo arenoso arcilloso	Limo arcillo (MH-SM-GC)	0.0-10.0	5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	09-20	15
Arcilla limo arenos	Arcilla limosa (CL)	10.0-26.0	18,0	-	-	-	-	-	-	-	-	10-40	25
NF [m]	17												
Perfil Simplificado - Interpretado													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _i [m]	w _{media} [%]	γ _h [kN/m ³]	N _{spt}	c [kN/m ²]	φ [°]					
Suelo Residual	Fino	0.0-10.0	10,0	0,0	16,5	15	0,0	26,5					
Saprolito	Fino	10.0-26.0	16,0	0,0	18,0	25	0,0	29,6					
	Roca fracturada	26.0-30.0	4,0	-	21,0	>60	60,0	35,0					
Valores asumidos										UCS [kPa]	600		

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Borzbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils	Clayey soils
N ₆₀ and E _{PMT}	$E_{PMT} = 1.33 \times (N_{60})^{0.77}$ $R^2 = 0.82$	$E_{PMT} = 1.61 \times (N_{60})^{0.71}$ $R^2 = 0.72$
N ₆₀ and p _L	$p_L = 0.33 \times (N_{60})^{0.51}$ $R^2 = 0.74$	$p_L = 0.26 \times (N_{60})^{0.57}$ $R^2 = 0.67$
E _{PMT} and p _L	$p_L = 0.36 \times (E_{PMT})^{0.59}$ $R^2 = 0.35$	$p_L = 0.20 \times (E_{PMT})^{0.76}$ $R^2 = 0.85$
p _L and s _w	-	$s_w = 0.35 \times (p_L - e_w)^{0.96}$ $R^2 = 0.76$ β ⁰ ranging from 5.5 to 15 with an average of 8
N ₆₀ and E _{PMT} /p _L	Increasing trend	No definite trend

Clayton (1995) provides the following relationship between the unconfined compressive strength (UCS) and the corrected SPT value (N₆₀) for weak rocks.

$$UCS \geq 10 N_{60} \text{ (kPa)} \quad (1)$$

Perforación	SPT 3												
Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_{media} [m]	w [%]	w_{media} [%]	γ_d [g/cm³]	γ_{dm} [g/cm³]	q_u [kg/cm²]	q_{umedia} [kg/cm²]	c [kg/cm²]	φ [°]	N_{spt}	N_{sptmedio}
Limo arenoso arcilloso	Limo arcillo (MH-SM-GC)	0.0-10.0	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	09-20	15
Arcilla limo arenos	Arcilla limosa (CL)	10.0-26.0	18.0	-	-	-	-	-	-	-	-	10-40	25
NF [m]	3												
Perfil Simplificado - Interpretado													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_i [m]	w_{media} [%]	γ_h [kN/m³]	N_{spt}	c [kN/m²]	φ [°]					
Suelo Residual	Fino	0.0-10.0	10.0	0.0	16.5	15	0.9	24.4					
Saprolito	Fino	10.0-26.0	16.0	0.0	18.0	25	0.0	26.5					
	Roca fracturada	26.0-30.0	4.0		21.0	>60	60.0	35.0					
	Valores asumidos							UCS [kPa]	600				

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Bozbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils		Clayey soils	
N ₆₀ and E _{PMR}	$E_{PMR} = 1.33 \times (N_{60})^{0.77}$	R ² = 0.82	$E_{PMR} = 1.61 \times (N_{60})^{0.71}$	R ² = 0.72
N ₆₀ and p _t	$p_t = 0.33 \times (N_{60})^{0.51}$	R ² = 0.74	$p_t = 0.26 \times (N_{60})^{0.57}$	R ² = 0.67
E _{PMR} and p _t	$p_t = 0.36 \times (E_{PMR})^{0.59}$	R ² = 0.75	$p_t = 0.20 \times (E_{PMR})^{0.56}$	R ² = 0.85
p _t and s _v	-		$s_v = 0.35 \times (p_t - \sigma_v)^{0.86}$	R ² = 0.76
			β ⁸ ranging from 5.5 to 15 with an average of 8	
N ₆₀ and E _{PMR} /p _t	Increasing trend		No definitive trend	

Clayton (1995) provides the following relationship between the unconfined compressive strength (UCS) and the corrected SPT value (N₆₀) for weak rocks.

$$UCS \geq 10 N_{60} \text{ (kPa)} \quad (1)$$

Perforación	SPT 1												
Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_{media} [m]	w [%]	w_{media} [%]	γ_d [g/cm³]	γ_{dm} [g/cm³]	q_u [kg/cm²]	q_{umedia} [kg/cm²]	c [kg/cm²]	φ [°]	N_{spt}	N_{sptmedio}
Limo arenoso arcilloso	Limo arcillo (MH-SM-GC)	0.0-10.0	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	09-20	15
Arcilla limo arenos	Arcilla limosa (CL)	10.0-26.0	18.0	-	-	-	-	-	-	-	-	10-40	25
NF [m]	18												
<i>*Se realizó un corte de 5m luego de la exploración</i>													
Perfil Simplificado - Interpretado													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_i [m]	w_{media} [%]	γ_h [kN/m³]	N_{spt}	c [kN/m²]	φ [°]					
Suelo Residual	Fino	0.0-10.0	10.0	0.0	16.5	15	0.0	29.1					
Saprolito	Fino	10.0-26.0	16.0	0.0	18.0	25	34.9	20.1					
	Roca fracturada	26.0-30.0	4.0		21.0	>60	60.0	35.0					
	Valores asumidos							UCS [kPa]	600				

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Bozbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils		Clayey soils	
N ₆₀ and E _{PMR}	$E_{PMR} = 1.33 \times (N_{60})^{0.77}$	R ² = 0.82	$E_{PMR} = 1.61 \times (N_{60})^{0.71}$	R ² = 0.72
N ₆₀ and p _t	$p_t = 0.33 \times (N_{60})^{0.51}$	R ² = 0.74	$p_t = 0.26 \times (N_{60})^{0.57}$	R ² = 0.67
E _{PMR} and p _t	$p_t = 0.36 \times (E_{PMR})^{0.59}$	R ² = 0.75	$p_t = 0.20 \times (E_{PMR})^{0.56}$	R ² = 0.85
p _t and s _v	-		$s_v = 0.35 \times (p_t - \sigma_v)^{0.86}$	R ² = 0.76
			β ⁸ ranging from 5.5 to 15 with an average of 8	
N ₆₀ and E _{PMR} /p _t	Increasing trend		No definitive trend	

Clayton (1995) provides the following relationship between the unconfined compressive strength (UCS) and the corrected SPT value (N₆₀) for weak rocks.

$$UCS \geq 10 N_{60} \text{ (kPa)} \quad (1)$$

Figura 46. Perfil geotécnico base 3114

PROYECTO 3135

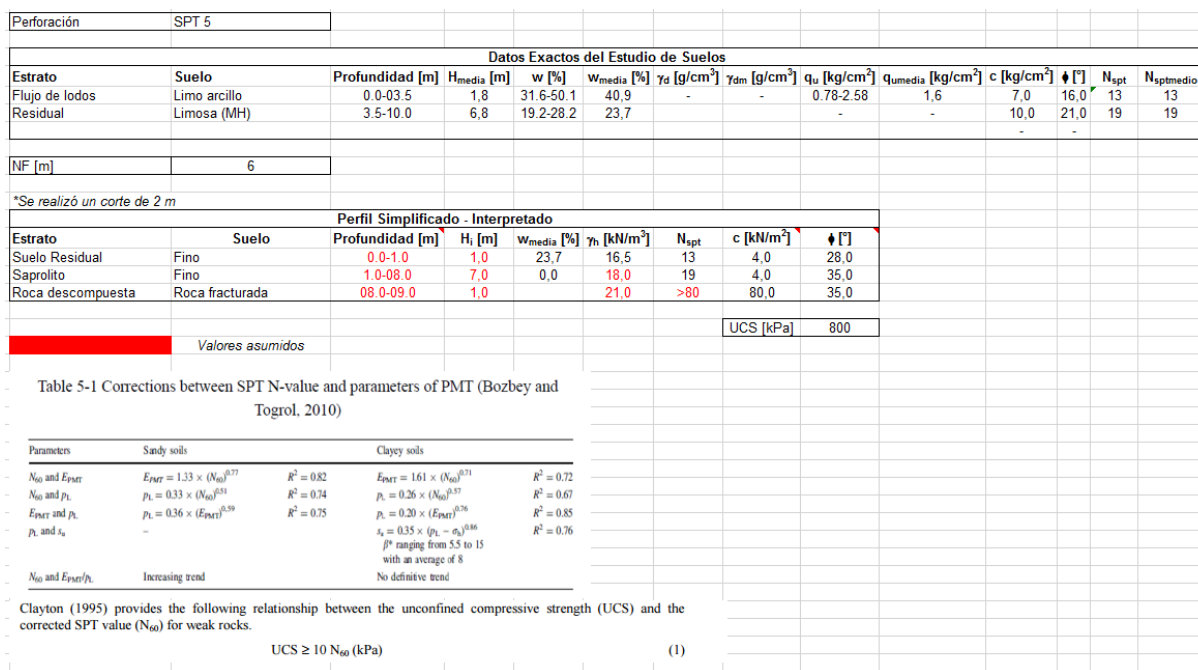


Figura 47. Perfil geotécnico base 3135

PROYECTO 3136

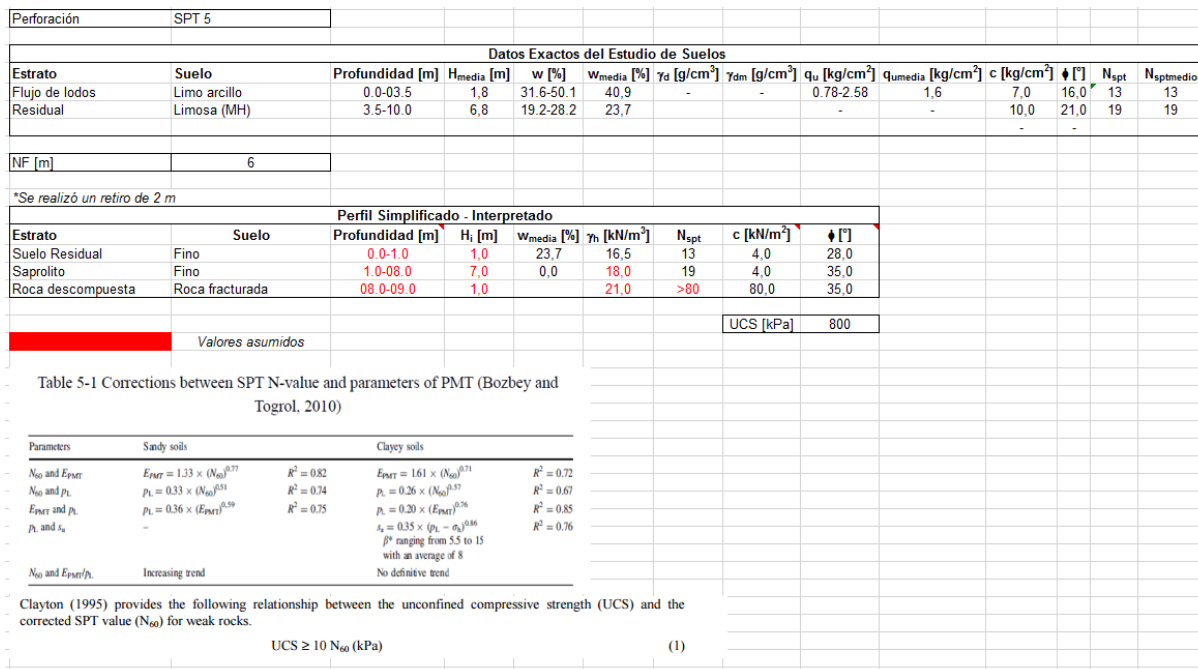


Figura 48. Perfil geotécnico base 3136

PROYECTO 3144

Perforación	SPT 3												
Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_{media} [m]	w [%]	w_{media} [%]	γ_d [g/cm³]	γ_{dm} [g/cm³]	q_u [kg/cm²]	q_{umedia} [kg/cm²]	c [kg/cm²]	φ [°]	N_{spt}	N_{sptmedio}
Depósito aluvial	Limo arcilloso (MH)	0.0-4.50	2,3	47.0-122.0	84,5	-	-	-	#¡VALOR!	0,00	-	12	12
Suelo Residual IC	Limosa (ML - SC)	04.5-15.5	10,0	20.0-41.0	30,5	-	-	-	-	0,01	27,0	17	17
NF [m]	20												
*Se realizó un retiro de 3m													
Perfil Simplificado - Interpretado													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_i [m]	w_{media} [%]	γ_h [kN/m³]	N_{spt}	c [kN/m²]	φ [°]					
Depósito aluvial	Fino	0.0-4.5	4,5	84,5	16,5	12	0,0	34,8					
Suelo Residual IC	Fino	4.5-15.5	11,0	30,5	17,0	17	0,0	33,0					
								UCS [kPa]	800				
Valores asumidos													

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Bozbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils	Clayey soils
N ₆₀ and E _{PMT}	$E_{PMT} = 1.33 \times (N_{60})^{0.77}$ $R^2 = 0.82$	$E_{PMT} = 1.61 \times (N_{60})^{0.71}$ $R^2 = 0.72$
N ₆₀ and p _L	$p_L = 0.33 \times (N_{60})^{0.51}$ $R^2 = 0.74$	$p_L = 0.26 \times (N_{60})^{0.57}$ $R^2 = 0.67$
E _{PMT} and p _L	$p_L = 0.36 \times (E_{PMT})^{0.59}$ $R^2 = 0.75$	$p_L = 0.20 \times (E_{PMT})^{0.76}$ $R^2 = 0.85$
p _L and s _w	-	$s_w = 0.35 \times (p_L - \sigma_v)^{0.86}$ $R^2 = 0.76$ β ⁰ ranging from 5.5 to 15 with an average of 8
N ₆₀ and E _{PMT} /p _L	Increasing trend	No definitive trend

Clayton (1995) provides the following relationship between the unconfined compressive strength (UCS) and the corrected SPT value (N₆₀) for weak rocks.

$$UCS \geq 10 N_{60} \text{ (kPa)} \quad (1)$$

Perforación	SPT 4												
Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_{media} [m]	w [%]	w_{media} [%]	γ_d [g/cm³]	γ_{dm} [g/cm³]	q_u [kg/cm²]	q_{umedia} [kg/cm²]	c [kg/cm²]	φ [°]	N_{spt}	N_{sptmedio}
Depósito aluvial	Limo arcilloso	0.0-4.00	2,0	50.0-96.0	73,0	-	-	-	#¡VALOR!	0,00	-	12	12
Suelo Residual IC	Limosa (CL-ML - SC-SM)	04.0-13.5	8,8	21.0-49.0	35,0	-	-	-	-	0,01	27,0	17	17
NF [m]	0.4												
*Se realizó un retiro de 3m													
Perfil Simplificado - Interpretado													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H_i [m]	w_{media} [%]	γ_h [kN/m³]	N_{spt}	c [kN/m²]	φ [°]					
Depósito aluvial	Fino	0.0-4.5	4,5	73,0	16,5	12	0,0	25,0					
Suelo Residual IC	Fino	4.5-15.5	11,0	35,0	17,0	17	0,0	36,4					
								UCS [kPa]	800				
Valores asumidos													

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Bozbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils	Clayey soils
N ₆₀ and E _{PMT}	$E_{PMT} = 1.33 \times (N_{60})^{0.77}$ $R^2 = 0.82$	$E_{PMT} = 1.61 \times (N_{60})^{0.71}$ $R^2 = 0.72$
N ₆₀ and p _L	$p_L = 0.33 \times (N_{60})^{0.51}$ $R^2 = 0.74$	$p_L = 0.26 \times (N_{60})^{0.57}$ $R^2 = 0.67$
E _{PMT} and p _L	$p_L = 0.36 \times (E_{PMT})^{0.59}$ $R^2 = 0.75$	$p_L = 0.20 \times (E_{PMT})^{0.76}$ $R^2 = 0.85$
p _L and s _w	-	$s_w = 0.35 \times (p_L - \sigma_v)^{0.86}$ $R^2 = 0.76$ β ⁰ ranging from 5.5 to 15 with an average of 8
N ₆₀ and E _{PMT} /p _L	Increasing trend	No definitive trend

Clayton (1995) provides the following relationship between the unconfined compressive strength (UCS) and the corrected SPT value (N₆₀) for weak rocks.

$$UCS \geq 10 N_{60} \text{ (kPa)} \quad (1)$$

Perforación	SPT 1												
Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _{dm} [g/cm ³]	q _u [kg/cm ²]	q _u media [kg/cm ²]	c [kg/cm ²]	φ [°]	N _{spt}	N _{spt} medio
Suelo Residual IB	Limo arcilloso (MH-SM)	0.0-12.0	6,0	30.0-37.0	33,5	-	-	-	-	0,00	-	6	6
Suelo Residual IC	Limosa (CL-ML - SC-SM)	12.0-15.5	13,8	28.0-33.0	30,5	-	-	-	#¡VALOR!	0,01	27,0	11	11
NF [m]	11,8												
*Se realizó un retiro de 9m													
Perfil Simplificado - Interpretado													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _i [m]	w _{media} [%]	γ _t [kN/m ³]	N _{spt}	c [kN/m ²]	φ [°]					
Suelo Residual IB	Fino	0.0-12.0	12,0	33,5	17,0	6	0,0	25,3					
Suelo Residual IC	Fino	12.0-15.5	3,5	30,5	17,0	11	0,0	28,3					
							UCS [kPa]	800					
Valores asumidos													

Table 5-1 Corrections between SPT N-value and parameters of PMT (Bozbey and Togrol, 2010)

Parameters	Sandy soils	Clayey soils
N ₆₀ and E _{PMR}	E _{PMR} = 1.33 × (N ₆₀) ^{0.77} R ² = 0.82	E _{PMR} = 1.61 × (N ₆₀) ^{0.71} R ² = 0.72
N ₆₀ and p _L	p _L = 0.33 × (N ₆₀) ^{0.51} R ² = 0.34	p _L = 0.26 × (N ₆₀) ^{0.57} R ² = 0.67
E _{PMR} and p _L	p _L = 0.36 × (E _{PMR}) ^{0.59} R ² = 0.75	p _L = 0.20 × (E _{PMR}) ^{0.56} R ² = 0.85
p _L and s _w	-	s _w = 0.35 × (p _L - σ _v) ^{0.86} R ² = 0.76 β ⁰ ranging from 5.5 to 15 with an average of 8
N ₆₀ and E _{PMR} /p _L	Increasing trend	No definitive trend

Clayton (1995) provides the following relationship between the unconfined compressive strength (UCS) and the corrected SPT value (N₆₀) for weak rocks.

$$UCS \geq 10 N_{60} \text{ (kPa)} \tag{1}$$

Figura 49. Perfil geotécnico base 3144

PROYECTO ADC1

Perforación		Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _m [kN/m ³]	q _u [kg/cm ²]	E [kPa]	c [kPa]	φ [°]	N _{spt}	N _{spt60}		
Lleno antrópico	-	0.0-0.40	0.2	-	-	-	16.0	-	6000.0	10.00	7.0	-	-		
Materia orgánica	Limo	0.40-1.00	0.7	-	-	-	14.0	-	6000.0	6.00	4.0	-	8		
Ceniza volcánica	Limo alta plasticidad	1.00-1.40	1.2	116.3	-	-	14.0	-	6000.0	9.00	5.0	-	2		
Depósito aluvial fino	MH	1.40-5.00	3.2	42.8	-	-	17.0	-	11000.0	12.00	12.0	-	8		
Saprolito Granodiorita	SM-SC	5.00-12.0	8.5	36.8	-	-	19.0	-	23000.0	9.00	19.0	-	16		
Saprolito Granodiorita Durr	SM-SC	12.0-17.0	14.5	32.4	-	-	20.0	-	30000.0	18.00	25.0	-	22		
NF [m]		2													

*Se estima un retiro de 1m de material

Figura 50. Perfil geotécnico base ADC1

PROYECTO ADC2

Perforación		Datos Exactos del Estudio de Suelos													
Estrato	Suelo	Profundidad [m]	H _{media} [m]	w [%]	w _{media} [%]	γ _d [g/cm ³]	γ _m [kN/m ³]	q _u [kg/cm ²]	E [kPa]	c [kPa]	φ [°]	N _{spt}	N _{spt60}		
Llenos y cenizas	Limos	0.00-3.50	1.70	30	-	-	15.0	60	3000.0	0.00	15.0	-	5		
Qfl - Limos arenosos con bloques	Limo con arenas	3.50-15.0	9.30	40	-	-	17.0	75	5000.0	12.00	25.0	-	10		
Srm - Suelo residual maduro	Limo	15.0-27.0	21.00	35	-	-	18.0	-	10000.0	25.00	18.0	-	18		
NF [m]		12													

Figura 51. Perfil geotécnico base ADC2

ANEXO 2. MEMORIAS DE METODOLOGÍAS APLICADAS A CADA PROYECTO.

En este anexo se muestran las metodologías aplicadas a cada uno de los micropilotes de proyectos.

Existen algunos micropilotes que razones de sistema constructivo y/o falta de información no pudieron ser analizados por alguna metodología en particular pero si por otra.

A los micropilotes autoperforantes de los proyectos 3088, 3113 y 3144 no se les puede aplicar el Para dar cumplimiento al objetivo de esta investigación, se definieron tres metodologías de diseño, las cuales se consideran algunas de las más aceptadas y reconocidas a nivel mundial. Las metodologías seleccionadas son:

- Considerada una de las primeras (sino la primera) referencias en cuanto al diseño de micropilotes, por tanto es el punto de partida de muchas metodologías.
- Norma Española, la cual presenta dos métodos de diseño, uno racional y otro con base en tablas, destaca en esta metodología la inclusión de la influencia de la presión de inyección.
- Guía de USA, la cual aparte del diseño geotécnico contiene apuntes sobre el diseño estructural, construcción y control en obra de micropilotes.

MÉTODO DE BUSTAMANTE & DOIX puesto que dichos elementos se construyeron con inycción simultánea tipo E y no con Tipo B:IGU (Inyección Global Única) o Tipo D:IRS (Inyección Repetitiva Selectiva).

MÉTODO DE BUSTAMANTE & DOIX

Proyecto	3089 Índigo Etapa 2	ID	Micropilote 3												
L _{total} [m]	11,6														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	11,6														
D _d [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{ei} [m]	α	D _{ei} [m]	N ₆₀ *	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Fino	7.0	7.0	7.0	1.50	0.229	18	0.20177337	201.773367	1014.350341	152.152551	1166.50289	
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena	9.0	16.0	4.6	1.45	0.221	42	0.27091754	270.917543	865.16273	129.774409	994.937139	
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Roca fracturada	14.0	30.0	0.0	1.20	0.183	>60	0.38862222	388.622222	0	0	0	
						11,6									
Qp [kN]	1879.513071														
P [t]	191.59														
* En este proyecto no fue posible determinar un N corregido se tomará como un N ₆₀															
Proyecto	3089 Índigo Etapa 2	ID	Micropilote 8												
L _{total} [m]	11,6														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	11,6														
D _d [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{ei} [m]	α	D _{ei} [m]	N ₆₀ *	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Fino	7.0	7.0	7.0	1.50	0.229	18	0.20177337	201.773367	1014.350341	152.152551	1166.50289	
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena	9.0	16.0	4.6	1.45	0.221	42	0.27091754	270.917543	865.16273	129.774409	994.937139	
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Roca fracturada	14.0	30.0	0.0	1.20	0.183	>60	0.38862222	388.622222	0	0	0	
						11,6									
Qp [kN]	1879.513071														
P [t]	191.59														
* En este proyecto no fue posible determinar un N corregido se tomará como un N ₆₀															
Proyecto	3089 Índigo Etapa 2	ID	Micropilote B19-3												
L _{total} [m]	11,6														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	11,6														
D _d [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{ei} [m]	α	D _{ei} [m]	N ₆₀ *	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Fino	7.0	7.0	7.0	1.50	0.229	18	0.20177337	201.773367	1014.350341	152.152551	1166.50289	
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena	9.0	16.0	4.6	1.45	0.221	42	0.27091754	270.917543	865.16273	129.774409	994.937139	
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Roca fracturada	14.0	30.0	0.0	1.20	0.183	>60	0.38862222	388.622222	0	0	0	
						11,6									
Qp [kN]	1879.513071														
P [t]	191.59														
* En este proyecto no fue posible determinar un N corregido se tomará como un N ₆₀															
Proyecto	3089 Índigo Etapa 2	ID	Micropilote C17-47												
L _{total} [m]	13,7														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	13,7														
D _d [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{ei} [m]	α	D _{ei} [m]	N ₆₀ *	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Fino	7.0	7.0	7.0	1.50	0.229	18	0.20177337	201.773367	1014.350341	152.152551	1166.50289	
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena	9.0	16.0	6.7	1.45	0.221	42	0.27091754	270.917543	1260.128324	189.019249	1449.14757	
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Roca fracturada	14.0	30.0	0.0	1.20	0.183	>60	0.38862222	388.622222	0	0	0	
						13,7									
Qp [kN]	2274.478665														
P [t]	231.85														
* En este proyecto no fue posible determinar un N corregido se tomará como un N ₆₀															
Proyecto	3089 Índigo Etapa 2	ID	Micropilote B-15-117												
L _{total} [m]	14,0														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	14,0														
D _d [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{ei} [m]	α	D _{ei} [m]	N ₆₀ *	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Fino	7.0	7.0	7.0	1.50	0.229	18	0.20177337	201.773367	1014.350341	152.152551	1166.50289	
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena	9.0	16.0	7.0	1.45	0.221	42	0.27091754	270.917543	1316.55198	197.482797	1514.03478	
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Roca fracturada	14.0	30.0	0.0	1.20	0.183	>60	0.38862222	388.622222	0	0	0	
						14,0									
Qp [kN]	2330.902322														
P [t]	237.60														
* En este proyecto no fue posible determinar un N corregido se tomará como un N ₆₀															

Figura 52. Método Bustamante & Doix proyecto 3089

Proyecto 3091 Ventum Torre A															
ID	Microplote MP-D11														
L _{total} [m]	15,5														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	15,5														
D _s [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _s [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Qls	Qlp	QL	
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Fino	3,5	3,5	3,5	1,15	0,175	10	0,1495	149,50	288,0991051	43,2148658	331,313971	
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena	10,5	14,0	10,5	1,20	0,183	7	0,0914	91,37	551,21	82,6810089	633,887735	
3	14.0-20.0	Roca Descompuesta		6,0	20,0	1,5	1,20	0,183	65	0,40234274	402,342742	346,7396575	52,0109486	398,750606	
								15,5							
Qp [kN]	1186,045488														
P [t]	120,90														
Proyecto 3091 Ventum Torre A															
ID	Microplote MP-D11														
L _{total} [m]	15,5														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	15,5														
D _s [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _s [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Qls	Qlp	QL	
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Fino	3,5	3,5	3,5	1,15	0,175	10	0,1495	149,50	288,0991051	43,21	331,31	
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena	10,5	14,0	10,5	1,20	0,183	7	0,0914	91,37	551,21	82,68	633,89	
3	14.0-20.0	Roca Descompuesta		6,0	20,0	1,5	1,20	0,183	65	0,4023	402,34	346,74	52,01	398,75	
								15,5							
Qp [kN]	1186,045488														
P [t]	120,90														
Proyecto 3091 Ventum Torre A															
ID	Microplote MP-Q2														
L _{total} [m]	15,5														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	15,5														
D _s [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _s [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Qls	Qlp	QL	
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Fino	3,5	3,5	3,5	1,15	0,175	6	0,10784886	107,848863	207,8338558	31,1750784	239,008934	
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena	10,5	14,0	10,5	1,20	0,183	9	0,10163095	101,63095	613,100078	91,9650117	705,06509	
3	14.0-20.0	Roca Descompuesta		6,0	20,0	1,5	1,20	0,183	65	0,40234274	402,342742	346,7396575	52,0109486	398,750606	
								15,5							
Qp [kN]	1167,673591														
P [t]	119,03														
Proyecto 3091 Ventum Torre A															
ID	Microplote MP-Q2														
L _{total} [m]	15,5														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	15,5														
D _s [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _s [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Qls	Qlp	QL	
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Fino	3,5	3,5	3,5	1,15	0,175	6	0,10784886	107,848863	207,8338558	31,1750784	239,008934	
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena	10,5	14,0	10,5	1,20	0,183	9	0,10163095	101,63095	613,100078	91,9650117	705,06509	
3	14.0-20.0	Roca Descompuesta		6,0	20,0	1,5	1,20	0,183	65	0,40234274	402,342742	346,7396575	52,0109486	398,750606	
								15,5							
Qp [kN]	1167,673591														
P [t]	119,03														
Proyecto 3091 Ventum Torre A															
ID	Microplote MP-Q2														
L _{total} [m]	15,5														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	15,5														
D _s [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _s [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Qls	Qlp	QL	
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Fino	3,5	3,5	3,5	1,15	0,175	6	0,10784886	107,848863	207,8338558	31,1750784	239,008934	
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena	10,5	14,0	10,5	1,20	0,183	9	0,10163095	101,63095	613,100078	91,9650117	705,06509	
3	14.0-20.0	Roca Descompuesta		6,0	20,0	1,5	1,20	0,183	65	0,40234274	402,342742	346,7396575	52,0109486	398,750606	
								15,5							
Qp [kN]	1167,673591														
P [t]	119,03														
Proyecto 3091 Ventum Torre A															
ID	Microplote MP-Q2														
L _{total} [m]	15,5														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{bulbo} [m]	15,5														
D _s [m]	0,152	*Diámetro Perforación													
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _s [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Qls	Qlp	QL	
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Fino	3,5	3,5	3,5	1,15	0,175	6	0,10784886	107,848863	207,8338558	31,1750784	239,008934	
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena	10,5	14,0	10,5	1,20	0,183	9	0,10163095	101,63095	613,100078	91,9650117	705,06509	
3	14.0-20.0	Roca Descompuesta		6,0	20,0	1,5	1,20	0,183	65	0,40234274	402,342742	346,7396575	52,0109486	398,750606	
								15,5							
Qp [kN]	1167,673591														
P [t]	119,03														

Figura 53. Método Bustamante & Doix proyecto 3091

Proyecto		3114 Pinares del Carmelo		IRS												
ID	Micropilote MP P-17															
L _{total} [m]	15,0															
L _{libre} [m]	0,0															
L _{bulbo} [m]	15,0															
D _s [m]	0,114			*Diámetro Perforación												
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	T _{si} [kN]=Q _{Is}	Q _{lp}	QL		
1	0.00-5.00	Suelos Residual	Limos	5,0	5,0	5,0	1,50	0,171	7	0,11984615	119,846146	322,7612866	48,414193	371,17548		
2	5.00-21.0	Suelos Residual	Limos	16,0	21,0	10,0	1,50	0,171	11	0,158	157,688207	849,3497766	127,402466	976,752243		
						15,0						1172,111063	175,816659	1347,92772		
Q _p [kN]	1172,111063															
P [t]	119,48															
*El 2° suelo residual clasifica como una arena con base en la perforación del micropilote																
Proyecto		3114 Pinares del Carmelo		IRS												
ID	Micropilote MP F- 4															
L _{total} [m]	18,0															
L _{libre} [m]	0,0															
L _{bulbo} [m]	18,0															
D _s [m]	0,114			*Diámetro Perforación												
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	T _{si} [kN]=Q _{Is}	Q _{lp}	QL		
1	0.00-9.45	Suelos Residual	Limos	9,5	9,5	9,5	1,50	0,171	9	0,1405431	140,543096	715,366647	107,304997	822,671644		
2	9.45-18.4	Suelos Residual	Arena	9,0	18,4	8,6	1,45	0,166	13	0,17219076	172,190756	766,5492315	114,982385	881,531616		
						18,0						1481,915879	222,287382	1704,20326		
Q _p [kN]	1481,915879															
P [t]	151,06															
*El 2° suelo residual clasifica como una arena con base en la perforación del micropilote																
Proyecto		3114 Pinares del Carmelo		IRS												
ID	Micropilote MP B-13															
L _{total} [m]	20,0															
L _{libre} [m]	0,0															
L _{bulbo} [m]	20,0															
D _s [m]	0,114			*Diámetro Perforación												
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	T _{si} [kN]=Q _{Is}	Q _{lp}	QL		
1	0.00-9.45	Suelos Residual	Limos	9,5	9,5	9,5	1,50	0,171	11	0,15768821	157,688207	802,6355389	120,395331	923,03087		
2	9.45-20.4	Suelos Residual	Arena	11,0	20,4	10,6	1,45	0,166	11	0,15768821	157,688207	866,1952139	129,929282	996,124496		
						20,0						1668,830753	250,324613	1919,15537		
Q _p [kN]	1668,830753															
P [t]	170,12															
*El 2° suelo residual clasifica como una arena con base en la perforación del micropilote																

Figura 57. Método Bustamante & Doix proyecto 3114

Proyecto		3135 Camilo Medina		IU												
ID	Microplote PP															
L _{total} [m]	9,0															
L _{libre} [m]	0,0															
L _{bulbo} [m]	9,0															
D _s [m]	0,198			*Diámetro Perforación												
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	T _{si} [kN]=Q _{Is}	Q _{lp}	QL		
1	0.00-0.00	Flujos de lodos	Limos	0,0	0,0	0,0	1,15	0,228	13	0,09262766	92,627659	0	0	0		
2	0.00-7.00	Suelo Residual	Limos	7,0	7,0	7,0	1,15	0,228	19	0,11865219	118,652186	594,4972048	89,1745807	683,671786		
3	7.00-9.00	Material Rocoso	Roca	2,0	9,0	2,0	1,10	0,218	80	0,35880338	358,803381	491,3120317	73,6968048	565,008836		
						9,0						1085,809236	162,871385	1248,68062		
Q _p [kN]	1085,809236															
P [t]	110,68															

Figura 58. Método Bustamante & Doix proyecto 3135

Proyecto		3136 Federico Medina		IU											
ID	Microplote PP														
L _{total} [m]	9,0														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{sublo} [m]	9,0														
D _o [m]	0,198														
*Diámetro Perforación															
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.00-0.00	Flujos de lodos	Limos	0,0	0,0	0,0	1,15	0,228	13	0,09262766	92,627659	0	0	0	
2	0.00-7.00	Suelo Residual	Limos	7,0	7,0	7,0	1,15	0,228	19	0,11865219	118,652186	594,4972048	89,1745807	683,671786	
3	7.00-9.00	Material Rocoso	Roca	2,0	9,0	2,0	1,10	0,218	80	0,35880338	358,803381	491,3120317	73,6968048	565,008836	
						9,0									
Qp [kN]		1085,809236													
P [t]		110,68													

Figura 59. Método Bustamante & Doix proyecto 3136

Proyecto		Rio del este		IU											
ID	Microplote MP-P1														
L _{total} [m]	18,0														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{sublo} [m]	18,0														
D _o [m]	0,114														
*Diámetro Perforación															
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.00-2.5	Lleno Heterogeneo	Limos	2,5	2,5	2,5	1,15	0,131	10	0,15	150	154,4485488	23,1672823	177,615831	
2	2.50-6.50	Suelo Residual IB	Limos	4,0	6,5	4,0	1,15	0,131	20	0,25	250	411,8627969	61,7794195	473,642216	
3	6.50-18	Suelo Residual IC	Limos	11,5	18,0	11,5	1,10	0,125	30	0,25	250	1132,622691	169,893404	1302,5161	
						18,0									
Qp [kN]		1698,934037													
P [t]		173,18													

Proyecto		Rio del este		IU											
ID	Microplote MP-P2														
L _{total} [m]	15,0														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{sublo} [m]	15,0														
D _o [m]	0,114														
*Diámetro Perforación															
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.00-2.5	Lleno Heterogeneo	Limos	2,5	2,5	2,5	1,15	0,131	10	0,15	150	154,4485488	23,1672823	177,615831	
2	2.50-6.50	Suelo Residual IB	Limos	4,0	6,5	4,0	1,15	0,131	20	0,25	250	411,8627969	61,7794195	473,642216	
3	6.50-15.00	Suelo Residual IC	Limos	8,5	15,0	8,5	1,10	0,125	30	0,25	250	837,1559024	125,573385	962,729288	
						15,0									
Qp [kN]		1403,467248													
P [t]		143,06													

Proyecto		Rio del este		IU											
ID	Microplote MP-P2														
L _{total} [m]	15,0														
L _{libre} [m]	0,0														
L _{sublo} [m]	15,0														
D _o [m]	0,114														
*Diámetro Perforación															
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]=Qls	Qlp	QL	
1	0.00-2.5	Lleno Heterogeneo	Limos	2,5	2,5	2,5	1,15	0,131	10	0,15	150	154,4485488	23,1672823	177,615831	
2	2.50-6.50	Suelo Residual IB	Limos	4,0	6,5	4,0	1,15	0,131	20	0,25	250	411,8627969	61,7794195	473,642216	
3	6.50-15.00	Suelo Residual IC	Limos	8,5	15,0	8,5	1,10	0,125	50	0,3	300	1004,587083	150,688062	1155,27515	
						15,0									
Qp [kN]		1570,898429													
P [t]		160,13													

Figura 60. Método Bustamante & Doix proyecto 3144

Proyecto	ADC1 - Movich	IRS																		
ID	Microplote 1																			
L _{total} [m]	15,0																			
L _{libre} [m]	0,0																			
L _{subito} [m]	15,0																			
D _s [m]	0,203	*Diámetro Perforación																		
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Q _{ts}	Q _{lp}	QL						
1	0.00-0.40	Ceniza volcánica	Limos	0,4	0,4	0,4	1,50	0,305	2	0,04551764	45,5176357	17,4343003	2,61514505	20,0494453						
2	0.40-4.00	Deposito aluvial	Limos	3,6	4,0	3,6	1,50	0,305	8	0,1307001	130,700105	450,5502887	67,5825433	518,132832						
3	4.00-11.0	Saprolito granodiorita	Arena limosa	7,0	11,0	7,0	1,40	0,284	16	0,13754023	137,540228	860,4574333	129,068615	989,526048						
4	11.0-15.0	Saprolito granodiorita duro	Arena limosa	4,0	15,0	4,0	1,40	0,284	22	0,16831961	168,319608	601,7225881	90,2583882	691,980976						
						15,0						1930,16461	199,266303	1527,70833						
Q _p [kN]	1930,16461																			
P [t]	196,75																			

Figura 61. Método Bustamante & Doix proyecto ADC1

Proyecto	ADC2 - Ciudad del Bosque	IRS																		
ID	Microplote 1																			
L _{total} [m]	26,0																			
L _{libre} [m]	0,0																			
L _{subito} [m]	26,0																			
D _s [m]	0,203	*Diámetro Perforación																		
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _{si} [m]	α	D _{si} [m]	N ₆₀	q _{si} [MPa]	q _{si} [kPa]	Tsi [kN]-Q _{ts}	Q _{lp}	QL						
1	0.00-3.50	Llenos y cenizas	Limos	1,7	1,7	1,7	1,50	0,305	5	0,0945684	94,568422	153,942984	23,091448	177,03443						
2	3.50-15.0	Qlf - Limos arenosos con Limo con ar	Limo	9,3	11,0	9,3	1,40	0,284	10	0,1067608	106,76085	887,353306	133,103	1020,4563						
3	15.0-27.0	Srm - Suelo residual mad	Limo	21,0	32,0	15,0	1,40	0,284	18	0,2017734	201,77337	2704,93424	405,74014	3110,6744						
						26,0						3746,23053	561,93458	4308,1651						
Q _p [kN]	3746,230533																			
P [t]	381,88																			

Figura 62. Método Bustamante & Doix proyecto ADC2

GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA (GUÍA ESPAÑOLA)

Proyecto		3189 Índigo Etapa 2		F _c	1,5	IU		Σ	R _{res} [kN]	85,9							
ID	Micropilote 3	F _t	1,5	A _{ci} [m ²]	0,48	IR		R _{res} [kN]	572,6								
L _{tot} [m]	11,6																
L _{ins} [m]	0,0																
L _{ext} [m]	11,6																
D _i [m]	0,152																
NF [m]	5,0																
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva															
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{ins} [psi]	P _{ins} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ins} (z) [kPa]	R _{res} [kN]		
1	Suelo Residual	0.00-7.00	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	130	896,3	0,0	0,0	0,0		
			1,0	1,0	17,5	17,5	0,0	17,5	0,0	17,5	0,0	30,0	130	896,3	8,8	3,4	1,6
			2,0	2,0	17,5	35,0	0,0	35,0	0,0	35,0	0,0	30,0	130	896,3	17,5	6,7	3,2
			3,0	3,0	17,5	52,5	0,0	52,5	0,0	52,5	0,0	30,0	130	896,3	26,3	10,1	4,8
			4,0	4,0	17,5	70,0	0,0	70,0	0,0	70,0	0,0	30,0	130	896,3	35,0	13,5	6,4
			5,0	5,0	17,5	87,5	0,0	87,5	0,0	87,5	0,0	30,0	130	896,3	43,8	16,8	8,1
			6,0	6,0	17,5	105,0	9,8	95,2	0,0	95,2	0,0	30,0	130	896,3	346,4	133,3	63,8
2	Saprolito	7.00-16.0	7,0	7,0	17,5	122,5	19,6	102,9	0,0	30,0	130	896,3	350,2	134,8	64,5		
			8,0	8,0	18,0	140,5	29,4	111,1	0,0	37,0	130	896,3	343,0	172,3	82,5		
			9,0	9,0	18,0	158,5	39,2	119,3	0,0	37,0	130	896,3	346,3	174,0	83,3		
			10,0	10,0	18,0	176,5	49,0	127,5	0,0	37,0	130	896,3	349,5	175,6	84,1		
			11,0	11,0	18,0	194,5	58,8	135,7	0,0	37,0	130	896,3	352,8	177,2	84,9		
			12,0	11,6	18,0	205,3	64,7	140,6	0,0	37,0	130	896,3	354,8	178,2	85,3		
			13,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
3	Roca Descompuesta	16.0-30.0	14,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			15,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			16,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			17,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			18,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			19,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			20,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						

Proyecto		3189 Índigo Etapa 2		F _c	1,5	IU		Σ	R _{res} [kN]	85,9							
ID	Micropilote 8	F _t	1,5	A _{ci} [m ²]	0,48	IR		R _{res} [kN]	572,6								
L _{tot} [m]	11,6																
L _{ins} [m]	0,0																
L _{ext} [m]	11,6																
D _i [m]	0,152																
NF [m]	5,0																
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva															
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{ins} [psi]	P _{ins} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ins} (z) [kPa]	R _{res} [kN]		
1	Suelo Residual	0.00-7.00	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	130	896,3	0,0	0,0	0,0		
			1,0	1,0	17,5	17,5	0,0	17,5	0,0	17,5	0,0	30,0	130	896,3	8,8	3,4	1,6
			2,0	2,0	17,5	35,0	0,0	35,0	0,0	35,0	0,0	30,0	130	896,3	17,5	6,7	3,2
			3,0	3,0	17,5	52,5	0,0	52,5	0,0	52,5	0,0	30,0	130	896,3	26,3	10,1	4,8
			4,0	4,0	17,5	70,0	0,0	70,0	0,0	70,0	0,0	30,0	130	896,3	35,0	13,5	6,4
			5,0	5,0	17,5	87,5	0,0	87,5	0,0	87,5	0,0	30,0	130	896,3	43,8	16,8	8,1
			6,0	6,0	17,5	105,0	9,8	95,2	0,0	95,2	0,0	30,0	130	896,3	346,4	133,3	63,8
2	Saprolito	7.00-16.0	7,0	7,0	17,5	122,5	19,6	102,9	0,0	30,0	130	896,3	350,2	134,8	64,5		
			8,0	8,0	18,0	140,5	29,4	111,1	0,0	37,0	130	896,3	343,0	172,3	82,5		
			9,0	9,0	18,0	158,5	39,2	119,3	0,0	37,0	130	896,3	346,3	174,0	83,3		
			10,0	10,0	18,0	176,5	49,0	127,5	0,0	37,0	130	896,3	349,5	175,6	84,1		
			11,0	11,0	18,0	194,5	58,8	135,7	0,0	37,0	130	896,3	352,8	177,2	84,9		
			12,0	11,6	18,0	205,3	64,7	140,6	0,0	37,0	130	896,3	354,8	178,2	85,3		
			13,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
3	Roca Descompuesta	16.0-30.0	14,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			15,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			16,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			17,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			18,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			19,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			20,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						

Proyecto		3189 Índigo Etapa 2		F _c	1,5	IU		Σ	R _{res} [kN]	85,9							
ID	Micropilote B19-3	F _t	1,5	A _{ci} [m ²]	0,48	IR		R _{res} [kN]	572,6								
L _{tot} [m]	11,6																
L _{ins} [m]	0,0																
L _{ext} [m]	11,6																
D _i [m]	0,152																
NF [m]	5,0																
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva															
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{ins} [psi]	P _{ins} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ins} (z) [kPa]	R _{res} [kN]		
1	Suelo Residual	0.00-7.00	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	130	896,3	0,0	0,0	0,0		
			1,0	1,0	17,5	17,5	0,0	17,5	0,0	17,5	0,0	30,0	130	896,3	8,8	3,4	1,6
			2,0	2,0	17,5	35,0	0,0	35,0	0,0	35,0	0,0	30,0	130	896,3	17,5	6,7	3,2
			3,0	3,0	17,5	52,5	0,0	52,5	0,0	52,5	0,0	30,0	130	896,3	26,3	10,1	4,8
			4,0	4,0	17,5	70,0	0,0	70,0	0,0	70,0	0,0	30,0	130	896,3	35,0	13,5	6,4
			5,0	5,0	17,5	87,5	0,0	87,5	0,0	87,5	0,0	30,0	130	896,3	43,8	16,8	8,1
			6,0	6,0	17,5	105,0	9,8	95,2	0,0	95,2	0,0	30,0	130	896,3	346,4	133,3	63,8
2	Saprolito	7.00-16.0	7,0	7,0	17,5	122,5	19,6	102,9	0,0	30,0	130	896,3	350,2	134,8	64,5		
			8,0	8,0	18,0	140,5	29,4	111,1	0,0	37,0	130	896,3	343,0	172,3	82,5		
			9,0	9,0	18,0	158,5	39,2	119,3	0,0	37,0	130	896,3	346,3	174,0	83,3		
			10,0	10,0	18,0	176,5	49,0	127,5	0,0	37,0	130	896,3	349,5	175,6	84,1		
			11,0	11,0	18,0	194,5	58,8	135,7	0,0	37,0	130	896,3	352,8	177,2	84,9		
			12,0	11,6	18,0	205,3	64,7	140,6	0,0	37,0	130	896,3	354,8	178,2	85,3		
			13,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
3	Roca Descompuesta	16.0-30.0	14,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			15,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			16,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			17,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			18,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			19,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						
			20,0	18,0	60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9						

Proyecto		3189 Índigo Etapa 2		F _c		1,5		IU											
ID	Micropilote B19-3			F _t		1,5		IR											
L _{total} [m]	13,7			A _U [m ²]		0,48		IRS											
L _{inerte} [m]	0,0							N.A.											
L _{subso} [m]	13,7																		
D _o [m]	0,152																		
NF [m]	5,0																		
Tipo Inyección	IRS																		
<i>Inyección Repetitiva Selectiva</i>																			
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{inj} [psi]	P _{inj} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{fs,d} (z) [kPa]	R _{fs,d} [kN]				
1	Suelo Residual	0.00-7.00	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	130	896,3	0,0	0,0	0,0				
			1,0	1,0	17,5	17,5	0,0	17,5	0,0	30,0	130	896,3	8,8	3,4	1,6				
			2,0	2,0	17,5	35,0	0,0	35,0	0,0	30,0	130	896,3	17,5	6,7	3,2				
			3,0	3,0	17,5	52,5	0,0	52,5	0,0	30,0	130	896,3	26,3	10,1	4,8				
			4,0	4,0	17,5	70,0	0,0	70,0	0,0	30,0	130	896,3	35,0	13,5	6,4				
			5,0	5,0	17,5	87,5	0,0	87,5	0,0	30,0	130	896,3	43,8	16,8	8,1				
			6,0	6,0	17,5	105,0	9,8	95,2	0,0	30,0	130	896,3	346,4	133,3	63,8				
2	Saprolito	7.00-16.0	7,0	7,0	17,5	122,5	19,6	102,9	0,0	30,0	130	896,3	350,2	134,8	64,5				
			8,0	8,0	18,0	140,5	29,4	111,1	0,0	37,0	130	896,3	343,0	172,3	82,5				
			9,0	9,0	18,0	158,5	39,2	119,3	0,0	37,0	130	896,3	346,3	174,0	83,3				
			10,0	10,0	18,0	176,5	49,0	127,5	0,0	37,0	130	896,3	349,5	175,6	84,1				
			11,0	11,0	18,0	194,5	58,8	135,7	0,0	37,0	130	896,3	352,8	177,2	84,9				
			12,0	12,0	18,0	212,5	68,6	143,9	0,0	37,0	130	896,3	356,1	178,9	85,6				
			13,0	13,0	18,0	230,5	78,4	152,1	60,0	35,0	130	896,3	363,6	209,7	100,4				
			14,0	13,7	18,0	243,1	85,3	157,8	60,0	35,0	130	896,3	366,1	210,9	101,0				
			15,0		18,0					60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9			
			16,0		18,0					60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9			
3	Roca Descompuesta	16.0-30.0	17,0																
			18,0																
			19,0																
			20,0																

Proyecto		3189 Índigo Etapa 2		F _c		1,5		IU											
ID	Micropilote B-15-117			F _t		1,5		IR											
L _{total} [m]	14,0			A _U [m ²]		0,48		IRS											
L _{inerte} [m]	0,0							N.A.											
L _{subso} [m]	14,0																		
D _o [m]	0,152																		
NF [m]	5,0																		
Tipo Inyección	IRS																		
<i>Inyección Repetitiva Selectiva</i>																			
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{inj} [psi]	P _{inj} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{fs,d} (z) [kPa]	R _{fs,d} [kN]				
1	Suelo Residual	0.00-7.00	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	130	896,3	0,0	0,0	0,0				
			1,0	1,0	17,5	17,5	0,0	17,5	0,0	30,0	130	896,3	8,8	3,4	1,6				
			2,0	2,0	17,5	35,0	0,0	35,0	0,0	30,0	130	896,3	17,5	6,7	3,2				
			3,0	3,0	17,5	52,5	0,0	52,5	0,0	30,0	130	896,3	26,3	10,1	4,8				
			4,0	4,0	17,5	70,0	0,0	70,0	0,0	30,0	130	896,3	35,0	13,5	6,4				
			5,0	5,0	17,5	87,5	0,0	87,5	0,0	30,0	130	896,3	43,8	16,8	8,1				
			6,0	6,0	17,5	105,0	9,8	95,2	0,0	30,0	130	896,3	346,4	133,3	63,8				
2	Saprolito	7.00-16.0	7,0	7,0	17,5	122,5	19,6	102,9	0,0	30,0	130	896,3	350,2	134,8	64,5				
			8,0	8,0	18,0	140,5	29,4	111,1	0,0	37,0	130	896,3	343,0	172,3	82,5				
			9,0	9,0	18,0	158,5	39,2	119,3	0,0	37,0	130	896,3	346,3	174,0	83,3				
			10,0	10,0	18,0	176,5	49,0	127,5	0,0	37,0	130	896,3	349,5	175,6	84,1				
			11,0	11,0	18,0	194,5	58,8	135,7	0,0	37,0	130	896,3	352,8	177,2	84,9				
			12,0	12,0	18,0	212,5	68,6	143,9	0,0	37,0	130	896,3	356,1	178,9	85,6				
			13,0	13,0	18,0	230,5	78,4	152,1	60,0	35,0	130	896,3	363,6	209,7	100,4				
			14,0	14,0	18,0	248,5	88,2	160,3	60,0	35,0	130	896,3	367,1	211,4	101,2				
			15,0		18,0					60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9			
			16,0		18,0					60,0	35,0	130	896,3	298,8	179,5	85,9			
3	Roca Descompuesta	16.0-30.0	17,0																
			18,0																
			19,0																
			20,0																

Figura 63. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3089

Proyecto		3081 Ventum Torre A		F _c		1,0		IU											
ID	Micropilote MP-M1			F _t		1,0		IR											
L _{total} [m]	15,5			A _U [m ²]		0,48		IRS											
L _{inerte} [m]	0,0							N.A.											
L _{subso} [m]	15,5																		
D _o [m]	0,152																		
NF [m]	5,0																		
Tipo Inyección	N.A.																		
<i>No Aplica Guía Española</i>																			
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{inj} [psi]	P _{inj} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{fs,d} (z) [kPa]	R _{fs,d} [kN]				
1	Suelo Residual	0.00-3.50	0,0	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	344,7	0,0	0,0	0,0				
			1,0	1,0	16,0	16,0	0,0	16,0	0,0	28,0	50	344,7	8,5	2,9	1,4				
			2,0	2,0	16,0	32,0	0,0	32,0	0,0	28,0	50	344,7	17,0	5,7	2,7				
			3,0	3,0	16,0	48,0	0,0	48,0	0,0	28,0	50	344,7	25,5	8,6	4,1				
			3,5	3,5	16,0	56,0	0,0	56,0	62,0	15,8	50	344,7	40,8	69,6	33,3				
			4,5	4,5	16,0	72,0	0,0	72,0	62,0	15,8	50	344,7	52,4	71,7	34,3				
			5,5	5,5	16,0	88,0	4,9	83,1	62,0	15,8	50	344,7	60,5	73,2	35,1				
2	Saprolito	3.50-14.00	6,5	6,5	16,0	104,0	14,7	89,3	62,0	15,8	50	344,7	65,0	74,1	35,5				
			7,5	7,5	16,0	120,0	24,5	95,5	62,0	15,8	50	344,7	69,5	74,9	35,9				
			8,5	8,5	18,0	138,0	34,3	103,7	62,0	15,8	50	344,7	75,5	76,0	36,4				
			9,5	9,5	18,0	156,0	44,1	111,9	62,0	15,8	50	344,7	81,4	77,1	36,9				
			10,5	10,5	18,0	174,0	53,9	120,1	62,0	15,8	50	344,7	87,4	78,3	37,5				
			11,0	11,0	18,0	183,0	58,8	124,2	62,0	15,8	50	344,7	90,4	78,8	37,7				
			12,0	12,0	18,0	201,0	68,6	132,4	62,0	15,8	50	344,7	96,4	79,9	38,3				
			13,0	13,0	18,0	219,0	78,4	140,6	62,0	15,8	50	344,7	102,3	81,0	38,8				
			14,0	14,0	18,0	237,0	88,2	148,8	62,0	25,0	50	344,7	85,9	105,7	50,6				
			15,0	15,0	18,0	255,0	98,0	157,0	80,0	25,0	50	344,7	90,6	107,1	51,3				
3	Roca Descompuesta	20.0-30.0	16,0	15,5						80,0	25,0								
			17,0																
			18,0																
			19,0																

Proyecto		3091 Ventum Torre A		F _c		1,5		IU							
ID	Microplote MP-E6-2	F _t		1,5		IR		N.A.		Σ		R _{mg} [kN]		84,3	
L _{base} [m]	15,5	A _{ui} [m ²]		0,48		IRS						R _{mg} [kN]		562,0	
L _{base} [m]	0,0														
L _{base} [m]	15,5														
D _o [m]	0,152														
NF [m]	5,0														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva												P [t]	
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{int} [psi]	P _{int} [kPa]	α _v ' [kPa]	r _{mg} (z) [kPa]	R _{mg} [kN]
1	Suelo Residual	0.00-3.50	0,0	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	344,7	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	16,0	16,0	0,0	16,0	0,0	28,0	50	344,7	8,5	3,0	1,4
			2,0	2,0	16,0	32,0	0,0	32,0	0,0	28,0	50	344,7	17,0	6,0	2,9
			3,0	3,0	16,0	48,0	0,0	48,0	0,0	28,0	50	344,7	25,5	9,0	4,3
2	Saprolito	3.50-14.00	3,5	3,5	16,0	56,0	0,0	56,0	62,0	15,8	50	344,7	40,8	49,0	23,5
			4,5	4,5	16,0	72,0	0,0	72,0	62,0	15,8	50	344,7	52,4	51,2	24,5
			5,5	5,5	16,0	88,0	4,9	83,1	62,0	15,8	50	344,7	175,4	74,4	35,6
			6,5	6,5	16,0	104,0	14,7	89,3	62,0	15,8	50	344,7	179,9	75,3	36,0
			7,5	7,5	16,0	120,0	24,5	95,5	62,0	15,8	50	344,7	184,4	76,1	36,4
			8,5	8,5	16,0	136,0	34,3	103,7	62,0	15,8	50	344,7	190,4	77,2	37,0
			9,5	9,5	16,0	152,0	44,1	111,9	62,0	15,8	50	344,7	196,3	78,4	37,5
			10,5	10,5	16,0	174,0	53,9	120,1	62,0	15,8	50	344,7	202,3	79,5	38,1
			11,0	11,0	16,0	183,0	58,8	124,2	62,0	15,8	50	344,7	205,3	80,1	38,3
			12,0	12,0	16,0	201,0	68,6	132,4	62,0	15,8	50	344,7	211,3	81,2	38,9
3	Roca Descompuesta	14.0-20.0	13,0	13,0	18,0	219,0	78,4	140,6	62,0	15,8	50	344,7	217,2	82,3	39,4
			14,0	14,0	18,0	237,0	88,2	148,8	80,0	25,0	50	344,7	200,8	115,8	55,4
			15,0	15,0	18,0	255,0	98,0	157,0	80,0	25,0	50	344,7	205,6	117,2	56,1
			16,0	15,5	19,0	264,5	102,9	161,6	80,0	25,0	50	344,7	208,2	118,1	56,5
			17,0												
18,0															
19,0															
3	Roca Descompuesta	20.0-30.0													

Proyecto		3091 Ventum Torre A		F _c		1,5		IU							
ID	Microplote MP-D11	F _t		1,5		IR		N.A.		Σ		R _{mg} [kN]		87,3	
L _{base} [m]	15,5	A _{ui} [m ²]		0,48		IRS						R _{mg} [kN]		581,7	
L _{base} [m]	0,0														
L _{base} [m]	15,5														
D _o [m]	0,152														
NF [m]	3,0														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva												P [t]	
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{int} [psi]	P _{int} [kPa]	α _v ' [kPa]	r _{mg} (z) [kPa]	R _{mg} [kN]
1	Suelo Residual	0.00-3.50	0,0	0,0	16,5	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	344,7	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	16,5	16,5	0,0	16,5	0,0	28,0	50	344,7	12,0	4,3	2,0
			2,0	2,0	16,5	33,0	0,0	33,0	0,0	28,0	50	344,7	24,0	8,5	4,1
			3,0	3,0	16,5	49,5	0,0	49,5	0,0	28,0	50	344,7	36,0	12,8	6,1
2	Saprolito	3.50-14.00	3,5	3,5	18,0	58,5	4,9	53,6	62,0	15,8	50	344,7	39,0	48,7	23,3
			4,5	4,5	18,0	76,5	14,7	61,8	62,0	15,8	50	344,7	45,0	49,8	23,9
			5,5	5,5	18,0	94,5	24,5	70,0	62,0	15,8	50	344,7	165,9	72,6	34,8
			6,5	6,5	18,0	112,5	34,3	78,2	62,0	15,8	50	344,7	171,8	73,7	35,3
			7,5	7,5	18,0	130,5	44,1	86,4	62,0	15,8	50	344,7	177,8	74,9	35,8
			8,5	8,5	18,0	148,5	53,9	94,6	62,0	15,8	50	344,7	183,8	76,0	36,4
			9,5	9,5	18,0	166,5	63,7	102,8	62,0	15,8	50	344,7	189,7	77,1	36,9
			10,5	10,5	18,0	184,5	73,5	111,0	62,0	15,8	50	344,7	195,7	78,2	37,5
			11,0	11,0	18,0	193,5	78,4	115,1	62,0	15,8	50	344,7	181,4	75,5	36,2
			12,0	12,0	18,0	211,5	88,2	123,3	62,0	15,8	50	344,7	186,1	76,4	36,6
3	Roca Descompuesta	14.0-20.0	13,0	13,0	18,0	229,5	98,0	131,5	62,0	15,8	50	344,7	190,8	77,3	37,0
			14,0	14,0	21,0	250,5	107,8	142,7	80,0	25,0	50	344,7	257,6	133,4	63,9
			15,0	15,0	21,0	271,5	117,6	153,9	80,0	25,0	50	344,7	268,8	136,9	65,9
			16,0	15,5	21,0	282,0	122,5	159,5	80,0	25,0	50	344,7	274,4	138,6	66,4
			17,0												

Proyecto		3091 Ventum Torre A		F _c		1,5		IU							
ID	Microplote MP-O6	F _t		1,5		IR		N.A.		Σ		R _{mg} [kN]		84,4	
L _{base} [m]	15,5	A _{ui} [m ²]		0,48		IRS						R _{mg} [kN]		562,4	
L _{base} [m]	0,0														
L _{base} [m]	15,5														
D _o [m]	0,152														
NF [m]	5,0														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva												P [t]	
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{int} [psi]	P _{int} [kPa]	α _v ' [kPa]	r _{mg} (z) [kPa]	R _{mg} [kN]
1	Suelo Residual	0.00-3.50	0,0	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	344,7	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	16,0	16,0	0,0	16,0	0,0	28,0	50	344,7	8,5	3,0	1,4
			2,0	2,0	16,0	32,0	0,0	32,0	0,0	28,0	50	344,7	17,0	6,0	2,9
			3,0	3,0	16,0	48,0	0,0	48,0	0,0	28,0	50	344,7	25,5	9,0	4,3
2	Saprolito	3.50-14.00	3,5	3,5	16,0	56,0	0,0	56,0	62,0	15,8	50	344,7	40,8	49,0	23,5
			4,5	4,5	16,0	72,0	0,0	72,0	62,0	15,8	50	344,7	52,4	51,2	24,5
			5,5	5,5	16,0	88,0	4,9	83,1	62,0	15,8	50	344,7	175,4	74,4	35,6
			6,5	6,5	16,0	104,0	14,7	89,3	62,0	15,8	50	344,7	179,9	75,3	36,0
			7,5	7,5	16,0	120,0	24,5	95,5	62,0	15,8	50	344,7	184,4	76,1	36,4
			8,5	8,5	16,0	136,0	34,3	103,7	62,0	15,8	50	344,7	190,4	77,2	37,0
			9,5	9,5	16,0	152,0	44,1	111,9	62,0	15,8	50	344,7	196,3	78,4	37,5
			10,5	10,5	16,0	174,0	53,9	120,1	62,0	15,8	50	344,7	202,3	79,5	38,1
			11,0	11,0	16,0	183,0	58,8	124,2	62,0	15,8	50	344,7	205,3	80,1	38,3
			12,0	12,0	16,0	201,0	68,6	132,4	62,0	15,8	50	344,7	211,3	81,2	38,9
3	Roca Descompuesta	14.0-20.0	13,0	13,0	18,0	219,0	78,4	140,6	62,0	15,8	50	344,7	217,2	82,3	39,4
			14,0	14,0	18,0	237,0	88,2	148,8	80,0	25,0	50	344,7	200,8	115,8	55,4
			15,0	15,0	18,0	255,0	98,0	157,0	80,0	25,0	50	344,7	205,6	117,2	56,1
			16,0	15,5	19,0	264,5	102,9	161,6	80,0	25,0	51	351,6	210,5	118,8	56,9
			17,0												
18,0															
19,0															
3	Roca Descompuesta	20.0-30.0													

Proyecto		3091 Ventum Torre A		F _c		1,5		IU		IR		Σ		R _{ed} [kN]		84,3			
ID	Microplote MP-M1	F _s		1,5		A _{cu} [m ²]		0,48		IRS		N.A.		R _{ed} [kN]		562,0			
L _{base} [m]	15,5	D _o [m]		0,152		NF [m]		5,0		Tipo Inyección		IRS		Inyección Repetitiva Selectiva		P [t]		57,3	
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{int} [psi]	P _{int} [kPa]	α _s ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]				
1	Suelo Residual	0.00-3.50	0,0	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	344,7	0,0	0,0	0,0				
			1,0	1,0	16,0	16,0	0,0	16,0	0,0	28,0	50	344,7	8,5	3,0	1,4				
			2,0	2,0	16,0	32,0	0,0	32,0	0,0	28,0	50	344,7	17,0	6,0	2,9				
			3,0	3,0	16,0	48,0	0,0	48,0	0,0	28,0	50	344,7	25,5	9,0	4,3				
2	Saprolito	3.50-14.00	3,5	3,5	16,0	56,0	0,0	56,0	62,0	15,8	50	344,7	40,8	49,0	23,5				
			4,5	4,5	16,0	72,0	0,0	72,0	62,0	15,8	50	344,7	52,4	51,2	24,5				
			5,5	5,5	16,0	88,0	4,9	83,1	62,0	15,8	50	344,7	175,4	74,4	35,6				
			6,5	6,5	16,0	104,0	14,7	89,3	62,0	15,8	50	344,7	179,9	75,3	36,0				
			7,5	7,5	16,0	120,0	24,5	95,5	62,0	15,8	50	344,7	184,4	76,1	36,4				
			8,5	8,5	18,0	138,0	34,3	103,7	62,0	15,8	50	344,7	190,4	77,2	37,0				
			9,5	9,5	18,0	156,0	44,1	111,9	62,0	15,8	50	344,7	196,3	78,4	37,5				
			10,5	10,5	18,0	174,0	53,9	120,1	62,0	15,8	50	344,7	202,3	79,5	38,1				
			11,0	11,0	18,0	183,0	58,8	124,2	62,0	15,8	50	344,7	205,3	80,1	38,3				
			12,0	12,0	18,0	201,0	68,6	132,4	62,0	15,8	50	344,7	211,3	81,2	38,9				
3	Roca Descompuesta	14.0-20.0	13,0	13,0	18,0	219,0	78,4	140,6	62,0	15,8	50	344,7	217,2	82,3	39,4				
			14,0	14,0	18,0	237,0	88,2	148,8	80,0	25,0	50	344,7	200,8	115,8	55,4				
			15,0	15,0	18,0	255,0	98,0	157,0	80,0	25,0	50	344,7	205,6	117,2	56,1				
			16,0	15,5	19,0	264,5	102,9	161,6	80,0	25,0	50	344,7	208,2	118,1	56,5				
3	Roca Descompuesta	20.0-30.0	17,0																
			18,0																
			18,0																
			19,0																

Figura 64. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3091

Proyecto		3106 PARQUE BIBLIOTECA		F _c		1,5		IU		IR		Σ		R _{ed} [kN]		17,3			
ID	Microplote 124	F _s		1,5		A _{cu} [m ²]		0,40		IRS		N.A.		R _{ed} [kN]		115,5			
L _{base} [m]	6,5	D _o [m]		0,127		NF [m]		3,0		Tipo Inyección		IRS		Inyección Repetitiva Selectiva		P [t]		11,8	
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{int} [psi]	P _{int} [kPa]	α _s ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]				
1	Lleno Antrópico	0.00-3.50	0,0	0,0	18,0	0,0	0,0	0,0	3,7	18,0	130	896,3	0,0	2,5	1,0				
			1,0	1,0	18,0	18,0	0,0	18,0	3,7	18,0	130	896,3	12,4	5,2	2,1				
			2,5	2,5	18,0	45,0	0,0	45,0	3,7	18,0	130	896,3	31,1	9,2	3,7				
			3,5	3,5	18,0	63,0	4,9	58,1	3,7	18,0	130	896,3	40,1	11,2	4,5				
2	Lleno heterogéneo	3.50-5.50	4,0	4,0	18,0	72,0	9,8	62,2	0,0	29,0	130	896,3	32,0	11,8	4,7				
			5,5	5,5	16,7	97,1	24,5	72,6	0,0	29,0	130	896,3	336,1	124,2	49,6				
3	Depósito aluvial fino	5.50-6.50	6,5	6,5	16,7	113,8	34,3	79,5	0,0	29,0	130	896,3	339,7	125,5	50,1				
			7,5																
			8,5																

Proyecto		3114 PINARES DEL CARMELO		F _c		1,5		IU							
ID	Microplote MP-P-17	F _a		1,5		IR		N.A.		Σ		R _{ed} [kN]	72,1		
L _{base} [m]	15,0	A _u [m ²]		0,36		IRS						R _{ed} [kN]	480,7		
L _{base} [m]	0,0													P [t]	49,1
L _{subto} [m]	15,0														
D _u [m]	0,114														
NF [m]	3,0														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva													
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{ms} [psi]	P _{ms} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]
1	Suelos Residual	0.00-5.00	0,0	0,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,9	24,4	145	999,7	0,0	0,6	0,2
			1,0	1,0	17,0	17,0	0,0	17,0	0,9	24,4	145	999,7	10,0	3,6	1,3
			2,0	2,0	17,0	34,0	0,0	34,0	0,9	24,4	145	999,7	20,0	6,6	2,4
			3,0	3,0	17,0	51,0	0,0	51,0	0,9	24,4	145	999,7	29,9	9,7	3,5
			4,0	4,0	17,0	68,0	9,8	58,2	0,9	24,4	145	999,7	34,2	10,9	3,9
			5,0	5,0	17,0	85,0	19,6	65,4	0,9	24,4	145	999,7	38,4	12,2	4,4
			6,0	6,0	17,0	102,0	29,4	72,6	0,0	24,4	145	999,7	375,9	113,7	40,8
			7,0	7,0	17,0	119,0	39,2	79,8	0,0	26,6	145	999,7	377,3	126,0	45,2
			8,0	8,0	17,0	136,0	49,0	87,0	0,0	26,6	145	999,7	381,3	127,3	45,7
			9,0	9,0	17,0	153,0	58,8	94,2	0,0	26,6	145	999,7	385,3	128,6	46,2
2	Suelos Residual	5.00-21.0	10,0	10,0	17,0	170,0	68,6	101,4	0,0	26,6	145	999,7	389,2	129,9	46,7
			11,0	11,0	17,0	187,0	78,4	108,6	0,0	26,6	145	999,7	393,2	131,3	47,1
			12,0	12,0	17,0	204,0	88,2	115,8	0,0	26,6	145	999,7	397,2	132,6	47,6
			13,0	13,0	17,0	221,0	98,0	123,0	0,0	26,6	145	999,7	401,2	133,9	48,1
			14,0	14,0	17,0	238,0	107,8	130,2	0,0	26,6	145	999,7	405,1	135,3	48,6
			15,0	15,0	17,0	255,0	117,6	137,4	0,0	26,6	145	999,7	409,1	136,6	49,0

Proyecto		3114 PINARES DEL CARMELO		F _c		1,5		IU							
ID	Microplote MP-F-4	F _a		1,5		IR		N.A.		Σ		R _{ed} [kN]	54,5		
L _{base} [m]	15,0	A _u [m ²]		0,36		IRS						R _{ed} [kN]	363,3		
L _{base} [m]	0,0													P [t]	37,1
L _{subto} [m]	15,0														
D _u [m]	0,114														
NF [m]	17,0														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva													
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{ms} [psi]	P _{ms} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]
1	Suelos Residual	0.00-9.45	0,0	0,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,0	145	999,7	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	17,0	17,0	0,0	17,0	0,0	27,0	145	999,7	9,3	2,0	0,7
			2,0	2,0	17,0	34,0	0,0	34,0	0,0	27,0	145	999,7	18,6	4,0	1,4
			3,0	3,0	17,0	51,0	0,0	51,0	0,0	27,0	145	999,7	27,8	6,0	2,2
			4,0	4,0	17,0	68,0	0,0	68,0	0,0	27,0	145	999,7	37,1	8,0	2,9
			5,0	5,0	17,0	85,0	0,0	85,0	0,0	27,0	145	999,7	46,4	10,1	3,6
			6,0	6,0	17,0	102,0	0,0	102,0	0,0	27,0	145	999,7	388,9	84,2	30,3
			7,0	7,0	17,0	119,0	0,0	119,0	0,0	27,0	145	999,7	398,2	86,3	31,0
			8,0	8,0	17,0	136,0	0,0	136,0	0,0	27,0	145	999,7	407,5	88,3	31,7
			9,0	9,0	17,0	153,0	0,0	153,0	0,0	27,0	145	999,7	416,8	90,3	32,4
2	Suelos Residual	9.45-18.4	10,0	10,0	17,0	170,0	0,0	170,0	0,0	27,0	145	999,7	426,1	92,3	33,1
			11,0	11,0	18,0	188,0	0,0	188,0	0,0	30,0	145	999,7	427,2	103,7	37,2
			12,0	12,0	18,0	206,0	0,0	206,0	0,0	30,0	145	999,7	436,2	105,9	38,0
			13,0	13,0	18,0	224,0	0,0	224,0	0,0	30,0	145	999,7	445,2	108,0	38,8
			14,0	14,0	18,0	242,0	0,0	242,0	0,0	30,0	145	999,7	454,2	110,2	39,6
			15,0	15,0	18,0	260,0	0,0	260,0	0,0	30,0	145	999,7	463,2	112,4	40,4

Proyecto		3114 PINARES DEL CARMELO		F _c		1,5		IU							
ID	Microplote MP-B-13	F _a		1,5		IR		N.A.		Σ		R _{ed} [kN]	78,0		
L _{base} [m]	15,0	A _u [m ²]		0,36		IRS						R _{ed} [kN]	519,7		
L _{base} [m]	0,0													P [t]	53,0
L _{subto} [m]	15,0														
D _u [m]	0,114														
NF [m]	18,0														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva													
Estrato Nº	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{ms} [psi]	P _{ms} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]
1	Suelos Residual	0.00-9.45	0,0	0,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,2	145	999,7	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	17,0	17,0	0,0	17,0	0,0	28,2	145	999,7	9,0	3,2	1,2
			2,0	2,0	17,0	34,0	0,0	34,0	0,0	28,2	145	999,7	17,9	6,4	2,3
			3,0	3,0	17,0	51,0	0,0	51,0	0,0	28,2	145	999,7	26,9	9,6	3,5
			4,0	4,0	17,0	68,0	0,0	68,0	0,0	28,2	145	999,7	35,9	12,8	4,6
			5,0	5,0	17,0	85,0	0,0	85,0	0,0	28,2	145	999,7	44,9	16,0	5,8
			6,0	6,0	17,0	102,0	0,0	102,0	0,0	28,2	145	999,7	387,1	138,2	49,6
			7,0	7,0	17,0	119,0	0,0	119,0	0,0	28,2	145	999,7	396,1	141,4	50,8
			8,0	8,0	17,0	136,0	0,0	136,0	0,0	28,2	145	999,7	405,0	144,6	51,9
			9,0	9,0	17,0	153,0	0,0	153,0	0,0	28,2	145	999,7	414,0	147,8	53,1
2	Suelos Residual	9.45-20.40	10,0	10,0	17,0	170,0	0,0	170,0	0,0	28,2	145	999,7	423,0	151,0	54,2
			11,0	11,0	18,0	188,0	0,0	188,0	62,0	15,9	145	999,7	469,9	130,3	46,8
			12,0	12,0	18,0	206,0	0,0	206,0	62,0	15,9	145	999,7	483,0	132,8	47,7
			13,0	13,0	18,0	224,0	0,0	224,0	62,0	15,9	145	999,7	496,1	135,2	48,6
			14,0	14,0	18,0	242,0	0,0	242,0	62,0	15,9	145	999,7	509,2	137,7	49,4
			15,0	15,0	18,0	260,0	0,0	260,0	62,0	15,9	145	999,7	522,2	140,2	50,3

Figura 68. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3114

Proyecto		3135 CASA CAMILO MEDINA		F _c	1,5	IU		Σ	R _{ed} [kN]	37,7				
ID	Microplote MP MPP	F _t	1,5	A _v [m ²]	0,62	IR		R _{ed} [kN]	251,0					
L _{total} [m]	9,0	L _{libre} [m]	0,0	L _{subto} [m]	9,0	IRS		P [t]	25,6					
D _o [m]	0,198	NF [m]	2,5	Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva								
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{inj} [psi]	P _{inj} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]
1	Suelo residual	0.00-7.00	0,0	0,0	14,5	0,0	0,0	0,0	35,0	50	344,7	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	14,5	14,5	0,0	14,5	0,0	35,0	50	344,7	6,2	2,9
			2,0	2,0	14,5	29,0	0,0	29,0	0,0	35,0	50	344,7	12,4	5,8
			3,0	3,0	14,5	43,5	4,9	38,6	0,0	35,0	50	344,7	16,5	7,7
			4,0	4,0	14,5	58,0	14,7	43,3	0,0	35,0	50	344,7	18,5	8,6
			5,0	5,0	14,5	72,5	24,5	48,0	0,0	35,0	50	344,7	20,5	9,6
			6,0	6,0	14,5	87,0	34,3	52,7	0,0	35,0	50	344,7	137,4	64,1
			7,0	7,0	14,5	101,5	44,1	57,4	0,0	35,0	50	344,7	139,4	65,1
3	Material rocoso	7.00-9.00	8,0	8,0	14,5	116,0	53,9	62,1	80,0	35,0	50	344,7	141,4	119,3
			9,0	9,0	14,5	130,5	63,7	66,8	80,0	35,0	50	344,7	143,4	120,3

Figura 69. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3135

Proyecto		3136 CASA FEDERICO MEDINA		F _c	1,5	IU		Σ	R _{ed} [kN]	58,3				
ID	Microplote MP MPP	F _t	1,5	A _v [m ²]	0,62	IR		R _{ed} [kN]	388,7					
L _{total} [m]	9,0	L _{libre} [m]	0,0	L _{subto} [m]	9,0	IRS		P [t]	39,7					
D _o [m]	0,198	NF [m]	2,5	Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva								
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{inj} [psi]	P _{inj} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]
1	Suelo residual	0.00-7.00	0,0	0,0	14,5	0,0	0,0	0,0	35,0	50	700,0	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	14,5	14,5	0,0	14,5	0,0	35,0	50	700,0	6,2	2,9
			2,0	2,0	14,5	29,0	0,0	29,0	0,0	35,0	50	700,0	12,4	5,8
			3,0	3,0	14,5	43,5	4,9	38,6	0,0	35,0	50	700,0	16,5	7,7
			4,0	4,0	14,5	58,0	14,7	43,3	0,0	35,0	50	700,0	18,5	8,6
			5,0	5,0	14,5	72,5	24,5	48,0	0,0	35,0	50	700,0	20,5	9,6
			6,0	6,0	14,5	87,0	34,3	52,7	0,0	35,0	50	700,0	258,8	119,4
			7,0	7,0	14,5	101,5	44,1	57,4	0,0	35,0	50	700,0	257,8	120,3
3	Material rocoso	7.00-9.00	8,0	8,0	14,5	116,0	53,9	62,1	80,0	35,0	50	700,0	259,8	114,6
			9,0	9,0	14,5	130,5	63,7	66,8	80,0	35,0	50	700,0	261,8	115,6

Figura 70. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3136

Proyecto		3144 RIO DEL ESTE		F _c	1,5	IU		Σ	R _{ed} [kN]	80,9				
ID	Microplote MP-MP1	F _t	1,5	A _v [m ²]	0,36	IR		R _{ed} [kN]	539,2					
L _{total} [m]	18,0	L _{libre} [m]	0,0	L _{subto} [m]	18,0	IRS		P [t]	55,0					
D _o [m]	0,114	NF [m]	N.S.E	Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva								
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _s [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{inj} [psi]	P _{inj} [kPa]	σ _v ' [kPa]	r _{ed} (z) [kPa]	R _{ed} [kN]
1	Suelo Residual	0.00-3.50	0,0	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	700,0	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	15,0	15,0	0,0	15,0	0,0	28,0	50	700,0	8,0	2,8
			2,0	2,0	15,0	30,0	0,0	30,0	0,0	28,0	50	700,0	15,9	5,6
2	Saprolito	3.50-11.50	3,0	3,0	17,5	47,5	0,0	47,5	0,0	28,0	50	700,0	25,2	8,9
			4,0	4,0	17,5	65,0	0,0	65,0	0,0	28,0	50	700,0	34,5	12,2
			5,0	5,0	17,5	82,5	0,0	82,5	0,0	28,0	50	700,0	43,8	15,5
			6,0	6,0	17,5	100,0	0,0	100,0	0,0	28,0	50	700,0	286,4	101,5
			7,0	7,0	17,5	117,5	0,0	117,5	0,0	28,0	50	700,0	295,7	104,8
			8,0	8,0	17,5	135,0	0,0	135,0	0,0	28,0	50	700,0	305,0	108,1
			9,0	9,0	17,5	152,5	0,0	152,5	5,0	32,0	50	700,0	305,0	130,4
			10,0	10,0	17,5	170,0	0,0	170,0	5,0	32,0	50	700,0	313,2	133,8
			11,0	11,0	18,2	188,2	0,0	188,2	5,0	32,0	50	700,0	321,8	137,4
			12,0	12,0	18,2	206,4	0,0	206,4	5,0	32,0	50	700,0	330,4	141,0
			13,0	13,0	18,2	224,6	0,0	224,6	5,0	32,0	50	700,0	338,9	144,5
			14,0	14,0	18,2	242,8	0,0	242,8	5,0	32,0	50	700,0	347,5	148,1
			15,0	15,0	18,2	261,0	0,0	261,0	5,0	32,0	50	700,0	356,0	151,6
			16,0	16,0	18,2	279,2	0,0	279,2	5,0	32,0	50	700,0	364,6	155,2
			17,0	17,0	18,2	297,4	0,0	297,4	5,0	32,0	50	700,0	373,1	158,8
			18,0	18,0	18,2	315,6	0,0	315,6	5,0	32,0	50	700,0	381,7	162,3

Proyecto		3144 RIO DEL ESTE		F _z		1,5		IU							
ID	Microplote MP-MP2	F _z		1,5		IR						Σ		R _{es,d} [kN]	61,6
L _{total} [m]	15,0	A _U [m ²]		0,36		IRS								R _{es,d} [kN]	410,8
L _{libre} [m]	0,0					N.A.								P [t]	41,9
L _{subito} [m]	15,0														
D _o [m]	0,114														
NF [m]	0,4														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva													
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _n [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{em} [psi]	P _{em} [kPa]	α _n ' [kPa]	r _{es,d} (z), [kPa]	R _{es,d} [kN]
1	Suelo Residual	0.00-0.50	0,0	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	700,0	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	17,5	17,5	5,9	11,6	0,0	28,0	50	700,0	6,2	2,2	0,8
2	Saprolito	0.50-6.50	2,0	2,0	17,5	35,0	15,7	19,3	0,0	28,0	50	700,0	10,2	3,6	1,3
			3,0	3,0	17,5	52,5	25,5	27,0	0,0	28,0	50	700,0	14,3	5,1	1,8
			4,0	4,0	17,5	70,0	35,3	34,7	0,0	28,0	50	700,0	18,4	6,5	2,3
			5,0	5,0	17,5	87,5	45,1	42,4	0,0	28,0	50	700,0	22,5	8,0	2,9
			6,0	6,0	17,5	105,0	54,9	50,1	0,0	28,0	50	700,0	259,9	92,1	33,1
			7,0	7,0	17,5	122,5	64,7	57,8	0,0	28,0	50	700,0	264,0	93,6	33,6
			8,0	8,0	17,5	140,0	74,5	65,5	0,0	28,0	50	700,0	268,1	95,0	34,1
3	Roca Descompuesta	11.5-20	9,0	9,0	17,5	157,5	84,3	73,2	5,0	32,0	50	700,0	267,8	114,9	41,2
			10,0	10,0	17,5	175,0	94,1	80,9	5,0	32,0	50	700,0	271,4	116,4	41,8
			11,0	11,0	18,2	193,2	103,9	89,3	5,0	32,0	50	700,0	275,3	118,0	42,4
			12,0	12,0	18,2	211,4	113,7	97,7	5,0	32,0	50	700,0	279,3	119,7	43,0
			13,0	13,0	18,2	229,6	123,5	106,1	5,0	32,0	50	700,0	283,2	121,3	43,6
			14,0	14,0	18,2	247,8	133,3	114,5	5,0	32,0	50	700,0	287,2	123,0	44,2
			15,0	15,0	18,2	266,0	143,1	122,9	5,0	32,0	50	700,0	291,1	124,6	44,7

Proyecto		3144 RIO DEL ESTE		F _z		1,5		IU							
ID	Microplote MP-MP3	F _z		1,5		IR						Σ		R _{es,d} [kN]	72,9
L _{total} [m]	15,0	A _U [m ²]		0,36		RS								R _{es,d} [kN]	486,3
L _{libre} [m]	0,0					N.A.								P [t]	49,6
L _{subito} [m]	15,0														
D _o [m]	0,114														
NF [m]	11,8														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva													
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _n [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{em} [psi]	P _{em} [kPa]	α _n ' [kPa]	r _{es,d} (z), [kPa]	R _{es,d} [kN]
1	Suelo Residual	0.00-5.50	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	50	700,0	0,0	0,0	0,0
			1,0	1,0	17,5	17,5	0,0	17,5	0,0	28,0	50	700,0	9,3	3,3	1,2
			2,0	2,0	17,5	35,0	0,0	35,0	0,0	28,0	50	700,0	18,6	6,6	2,4
			3,0	3,0	17,5	52,5	0,0	52,5	0,0	28,0	50	700,0	27,9	9,9	3,5
3	Roca Descompuesta	11.5-20	4,0	4,0	17,5	70,0	0,0	70,0	0,0	28,0	50	700,0	37,1	13,2	4,7
			5,0	5,0	18,2	88,2	0,0	88,2	0,0	28,0	50	700,0	46,8	16,6	6,0
			6,0	6,0	18,2	106,4	0,0	106,4	0,0	28,0	50	700,0	289,8	102,7	36,9
			7,0	7,0	18,2	124,6	0,0	124,6	0,0	28,0	50	700,0	299,4	106,1	38,1
			8,0	8,0	18,2	142,8	0,0	142,8	0,0	28,0	50	700,0	309,1	109,6	39,3
			9,0	9,0	18,2	161,0	0,0	161,0	0,0	32,0	50	700,0	309,0	132,1	47,4
			10,0	10,0	18,2	179,2	0,0	179,2	5,0	32,0	50	700,0	317,6	135,6	48,7
			11,0	11,0	18,2	197,4	0,0	197,4	5,0	32,0	50	700,0	326,1	139,2	50,0
			12,0	12,0	18,2	215,6	2,0	213,6	5,0	32,0	50	700,0	333,8	142,4	51,1
			13,0	13,0	18,2	233,8	11,8	222,0	5,0	32,0	50	700,0	337,7	144,0	51,7
			14,0	14,0	18,2	252,0	21,6	230,4	5,0	32,0	50	700,0	341,7	145,7	52,3
			15,0	15,0	18,2	270,2	31,4	238,8	5,0	32,0	50	700,0	345,6	147,3	52,9

Figura 71. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto 3144

Proyecto		ADC1 - Movich		F _z		1,5		IU							
ID	Microplote 1	F _z		1,5		IR						Σ		R _{es,d} [kN]	57,9
L _{total} [m]	15,0	A _U [m ²]		0,64		IRS								R _{es,d} [kN]	385,7
L _{libre} [m]	0,0					N.A.								P [t]	39,4
L _{subito} [m]	15,0														
D _o [m]	0,203														
NF [m]	2,0														
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva													
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	γ _n [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	ψ [°]	P _{em} [psi]	P _{em} [kPa]	α _n ' [kPa]	r _{es,d} (z), [kPa]	R _{es,d} [kN]
1	Ceniza volcánica	0.00-1.00	0,0	0,0	14,0	0,0	0,0	0,0	9,0	5,0	50	344,7	0,0	6,0	3,8
			1,0	1,0	14,0	14,0	0,0	14,0	9,0	5,0	50	344,7	12,8	6,7	4,3
2	Deposito aluvial	1.00-4.00	2,0	2,0	17,0	31,0	0,0	31,0	12,0	12,0	50	344,7	24,6	11,5	7,3
			3,0	3,0	17,0	48,0	9,8	38,2	12,0	12,0	50	344,7	30,3	12,3	7,8
			4,0	4,0	17,0	65,0	19,6	45,4	12,0	12,0	50	344,7	36,0	13,1	8,4
			5,0	5,0	17,0	82,0	29,4	52,6	12,0	12,0	50	344,7	41,7	13,9	8,9
3	Saprolito granodiorita	4.00-11.0	6,0	6,0	19,0	101,0	39,2	61,8	9,0	19,0	50	344,7	156,6	41,9	26,8
			7,0	7,0	19,0	120,0	49,0	71,0	9,0	19,0	50	344,7	162,8	43,4	27,7
			8,0	8,0	19,0	139,0	58,8	80,2	9,0	19,0	50	344,7	169,0	44,8	28,6
			9,0	9,0	19,0	158,0	68,6	89,4	9,0	19,0	50	344,7	175,2	46,2	29,5
			10,0	10,0	19,0	177,0	78,4	98,6	9,0	19,0	50	344,7	181,4	47,6	30,4
			11,0	11,0	19,0	196,0	88,2	107,8	9,0	19,0	50	344,7	187,6	49,1	31,3
			12,0	12,0	19,0	215,0	98,0	117,0	9,0	19,0	50	344,7	193,8	50,5	32,2
4	Saprolito granodiorita	11.0-15.0	13,0	13,0	20,0	235,0	107,8	127,2	18,0	25,0	50	344,7	188,4	70,6	45,0
			14,0	14,0	20,0	255,0	117,6	137,4	18,0	25,0	50	344,7	194,2	72,4	46,2
			15,0	15,0	20,0	275,0	127,4	147,6	18,0	25,0	50	344,7	200,1	74,2	47,4

Figura 72. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto ADC1

Proyecto		ADC2 - Ciudad del Bosque	F _c		1.5	IU		Σ		R _{ed} [kN]	249.5							
ID	Microplote 1	F _r		1.5	IR		R _{ed} [kN]		1663.4									
L _{total} [m]	26.0					IRS		P [t]		169.7								
L _{libre} [m]	0.0					N.A.												
L _{bufo} [m]	26.0																	
D _d [m]	0.203																	
NF [m]	12.0																	
Tipo Inyección	IRS	Inyección Repetitiva Selectiva																
Estrato N°	Estrato	Profundidad [m]	z [m]	H [m]	A _U [m ²]	γ ₀ [kN/m ³]	σ [kPa]	μ [kPa]	σ' [kPa]	c' [kPa]	φ' [°]	P _{iny} [psi]	P _{iny} [kPa]	σ _c ' [kPa]	r _{ec,d} [t]	R _{ec,d} [kN]		
1	Llenos y cenizas	0.00-3.50	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	120	827.4	0.0	0.0	0.0		
			1.0	1.0	0.6	15.0	15.0	0.0	15.0	0.0	15.0	0.0	15.0	120	827.4	11.1	2.0	1.3
			2.0	2.0	0.6	15.0	30.0	0.0	30.0	0.0	30.0	0.0	15.0	120	827.4	22.2	4.0	2.5
			3.0	3.0	0.6	15.0	45.0	0.0	45.0	0.0	45.0	0.0	15.0	120	827.4	33.4	6.0	3.8
			3.5	3.5	0.3	15.0	52.5	0.0	52.5	0.0	52.5	0.0	15.0	120	827.4	38.9	7.0	2.2
			4.5	4.5	0.6	17.0	69.5	0.0	69.5	0.0	69.5	0.0	25.0	120	827.4	40.1	20.5	13.1
			5.5	5.5	0.6	17.0	86.5	0.0	86.5	0.0	86.5	0.0	25.0	120	827.4	325.7	109.3	69.7
			6.5	6.5	0.6	17.0	103.5	0.0	103.5	0.0	103.5	0.0	25.0	120	827.4	335.5	112.3	71.7
			7.5	7.5	0.6	17.0	120.5	0.0	120.5	0.0	120.5	0.0	25.0	120	827.4	345.4	115.4	73.6
			8.5	8.5	0.6	17.0	137.5	0.0	137.5	0.0	137.5	0.0	25.0	120	827.4	355.2	118.4	75.6
2	Qif - Limos arenosos cc	3.50-15.0	9.5	9.5	0.6	17.0	154.5	0.0	154.5	0.0	25.0	120	827.4	365.0	121.5	77.5		
			10.5	10.5	0.6	17.0	171.5	0.0	171.5	0.0	171.5	0.0	25.0	120	827.4	374.8	124.5	79.5
			11.5	11.5	0.6	17.0	188.5	0.0	188.5	0.0	188.5	0.0	25.0	120	827.4	384.6	127.6	81.4
			12.5	12.5	0.6	17.0	205.5	4.9	200.6	12.0	25.0	12.0	25.0	120	827.4	391.6	129.7	82.8
			13.5	13.5	0.6	17.0	222.5	14.7	207.8	12.0	25.0	12.0	25.0	120	827.4	395.8	131.0	83.6
			14.5	14.5	0.6	17.0	239.5	24.5	215.0	12.0	25.0	12.0	25.0	120	827.4	399.9	132.3	84.5
			15.0	15.0	0.3	17.0	248.0	29.4	218.6	12.0	25.0	12.0	25.0	120	827.4	402.0	133.0	84.2
			16.0	16.0	0.6	18.0	266.0	39.2	226.8	25.0	18.0	12.0	18.0	120	827.4	432.5	110.4	70.4
			17.0	17.0	0.6	18.0	284.0	49.0	235.0	25.0	18.0	12.0	18.0	120	827.4	438.2	111.6	71.2
			18.0	18.0	0.6	18.0	302.0	58.8	243.2	25.0	18.0	12.0	18.0	120	827.4	443.8	112.8	72.0
3	Srm - Suelo residual m	15.0-27.0	19.0	19.0	0.6	18.0	320.0	68.6	251.4	25.0	18.0	12.0	120	827.4	449.5	114.0	72.8	
			20.0	20.0	0.6	18.0	338.0	78.4	259.6	25.0	18.0	12.0	120	827.4	455.2	115.3	73.6	
			21.0	21.0	0.6	18.0	356.0	88.2	267.8	25.0	18.0	12.0	120	827.4	460.8	116.5	74.4	
			22.0	22.0	0.6	18.0	374.0	98.0	276.0	25.0	18.0	12.0	120	827.4	466.5	117.7	75.1	
			23.0	23.0	0.6	18.0	392.0	107.8	284.2	25.0	18.0	12.0	120	827.4	472.2	118.9	75.9	
			24.0	24.0	0.6	18.0	410.0	117.6	292.4	25.0	18.0	12.0	120	827.4	477.8	120.2	76.7	
			25.0	25.0	0.6	18.0	428.0	127.4	300.6	25.0	18.0	12.0	120	827.4	483.5	121.4	77.5	
			26.0	26.0	0.6	18.0	446.0	137.2	308.8	25.0	18.0	12.0	120	827.4	489.2	122.6	78.3	

Figura 73. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera (Guía Española) proyecto ADC2

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA)

Proyecto		3089 Indigo Etapa 2									
ID	Micropilote 3										
L _{total} [m]	11,6										
L _{apete} [m]	0,0										
L _{subte} [m]	11,6										
D ₂ [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	Hi [m]	H [m]	L ₂ [m]	α _{aporte} [kPa]	α _{diseño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	Q _L
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	7,0	7,0	7,0	50-145	97,50	326,77	49,01	375,78
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	9,0	16,0	4,6	95-240	167,50	368,90	55,33	424,23
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	14,0	30,0	0,0	N.A.	377,50	0,00	0,00	0,00
				11,6			695,67 104,35 800,02				
Pt [kN]		695,665									
P [t]		70,99									

Proyecto		3089 Indigo Etapa 2									
ID	Micropilote 8										
L _{total} [m]	11,6										
L _{apete} [m]	0,0										
L _{subte} [m]	11,6										
D ₂ [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	Hi [m]	H [m]	L ₂ [m]	α _{aporte} [kPa]	α _{diseño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	Q _L
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	7,0	7,0	7,0	50-145	97,50	326,77	49,01	375,78
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	9,0	16,0	4,6	95-240	167,50	368,90	55,33	424,23
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	14,0	30,0	0,0	N.A.	377,50	0,00	0,00	0,00
				11,6			695,67 104,35 800,02				
Pt [kN]		695,665									
P [t]		70,99									

Proyecto		3089 Indigo Etapa 2									
ID	Micropilote B19-3										
L _{total} [m]	11,6										
L _{apete} [m]	0,0										
L _{subte} [m]	11,6										
D ₂ [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	Hi [m]	H [m]	L ₂ [m]	α _{aporte} [kPa]	α _{diseño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	Q _L
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	7,0	7,0	7,0	50-145	97,50	326,77	49,01	375,78
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	9,0	16,0	4,6	95-240	167,50	368,90	55,33	424,23
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	14,0	30,0	0,0	N.A.	377,50	0,00	0,00	0,00
				11,6			695,67 104,35 800,02				
Pt [kN]		695,665									
P [t]		70,99									

Proyecto		3089 Indigo Etapa 2									
ID	Micropilote C17-47										
L _{total} [m]	13,7										
L _{apete} [m]	0,0										
L _{subte} [m]	13,7										
D ₂ [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	Hi [m]	H [m]	L ₂ [m]	α _{aporte} [kPa]	α _{diseño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	Q _L
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	7,0	7,0	7,0	50-145	97,50	326,77	49,01	375,78
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	9,0	16,0	6,7	95-240	167,50	537,31	80,60	617,91
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	14,0	30,0	0,0	N.A.	377,50	0,00	0,00	0,00
				13,7			864,08 129,61 993,69				
Pt [kN]		864,076									
P [t]		88,17									

Proyecto		3089 Indigo Etapa 2									
ID	Micropilote B-15-117										
L _{total} [m]	14,0										
L _{apete} [m]	0,0										
L _{subte} [m]	14,0										
D ₂ [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	Hi [m]	H [m]	L ₂ [m]	α _{aporte} [kPa]	α _{diseño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	Q _L
1	0.0-7.0	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	7,0	7,0	7,0	50-145	97,50	326,77	49,01	375,78
2	7.0-16.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	9,0	16,0	7,0	95-240	167,50	561,37	84,21	645,57
3	16.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	14,0	30,0	0,0	N.A.	377,50	0,00	0,00	0,00
				14,0			888,13 133,22 1021,35				
Pt [kN]		888,135									
P [t]		90,63									

Figura 74. FHWA proyecto 3089

Proyecto	3091 Ventum Torre A										
ID	Microplote MP-Q2										
L_{total} [m]	15,5										
L_{super} [m]	0,0										
L_{subter} [m]	15,5										
D_z [m]	0,152										
NF [m]	18,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_z [m]	α_{absorbo} [kPa]	α_{disipato} [kPa]	P_i [kN]-Q_{is}	Q_{ip}	QL
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	50-145	97,50	163,38	24,51	187,89
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	10,5	14,0	10,5	95-240	167,50	842,05	126,31	968,36
3	14.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	16,0	30,0	1,5	N.A.	377,50	271,11	40,67	311,77
				15,5					1276,54	191,48	1468,03
P_t [kN]	1276,544										
P [t]	130,26										
Proyecto	3091 Ventum Torre A										
ID	Microplote MP-E6-2										
L_{total} [m]	15,5										
L_{super} [m]	0,0										
L_{subter} [m]	15,5										
D_z [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo A <i>Inyección Gravedad</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_z [m]	α_{absorbo} [kPa]	α_{disipato} [kPa]	P_i [kN]-Q_{is}	Q_{ip}	QL
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	35-70	52,50	87,98	13,20	101,17
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	10,5	14,0	10,5	70-145	107,50	540,42	81,06	621,48
3	14.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	16,0	30,0	1,5	205-550	377,50	271,11	40,67	311,77
				15,5					899,51	134,93	1034,43
P_t [kN]	899,506										
P [t]	91,79										
Proyecto	3091 Ventum Torre A										
ID	Microplote MP-D11										
L_{total} [m]	15,5										
L_{super} [m]	0,0										
L_{subter} [m]	15,5										
D_z [m]	0,152										
NF [m]	3,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_z [m]	α_{absorbo} [kPa]	α_{disipato} [kPa]	P_i [kN]-Q_{is}	Q_{ip}	QL
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	50-145	97,50	163,38	24,51	187,89
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	10,5	14,0	10,5	95-240	167,50	842,05	126,31	968,36
3	14.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	16,0	30,0	1,5	N.A.	377,50	271,11	40,67	311,77
				15,5					1276,54	191,48	1468,03
P_t [kN]	1276,544										
P [t]	130,26										
Proyecto	3091 Ventum Torre A										
ID	Microplote MP-O6										
L_{total} [m]	15,5										
L_{super} [m]	0,0										
L_{subter} [m]	15,5										
D_z [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_z [m]	α_{absorbo} [kPa]	α_{disipato} [kPa]	P_i [kN]-Q_{is}	Q_{ip}	QL
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	50-145	97,50	163,38	24,51	187,89
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	10,5	14,0	10,5	95-240	167,50	842,05	126,31	968,36
3	14.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	16,0	30,0	1,5	N.A.	377,50	271,11	40,67	311,77
				15,5					1276,54	191,48	1468,03
P_t [kN]	1276,544										
P [t]	130,26										
Proyecto	3091 Ventum Torre A										
ID	Microplote MP-M1										
L_{total} [m]	15,5										
L_{super} [m]	0,0										
L_{subter} [m]	15,5										
D_z [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_z [m]	α_{absorbo} [kPa]	α_{disipato} [kPa]	P_i [kN]-Q_{is}	Q_{ip}	QL
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	50-145	97,50	163,38	24,51	187,89
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	10,5	14,0	10,5	95-240	167,50	842,05	126,31	968,36
3	14.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	16,0	30,0	1,5	N.A.	377,50	271,11	40,67	311,77
				15,5					1276,54	191,48	1468,03
P_t [kN]	1276,544										
P [t]	130,26										
Proyecto	3091 Ventum Torre A										
ID	Microplote MP-S2										
L_{total} [m]	15,5										
L_{super} [m]	0,0										
L_{subter} [m]	15,5										
D_z [m]	0,152										
NF [m]	5,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_z [m]	α_{absorbo} [kPa]	α_{disipato} [kPa]	P_i [kN]-Q_{is}	Q_{ip}	QL
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	50-145	97,50	163,38	24,51	187,89
2	3.50-14.0	Saprolito	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	10,5	14,0	10,5	95-240	167,50	842,05	126,31	968,36
3	14.0-30.0	Roca descompuesta	Shales blandos, pocos signos de meteorización	16,0	30,0	1,5	N.A.	377,50	271,11	40,67	311,77
				15,5					1276,54	191,48	1468,03
P_t [kN]	1276,544										
P [t]	130,26										

Figura 75. FHWA proyecto 3091

Proyecto		3106 PARQUE BIBLIOTECA									
ID	Microplote 124										
L _{total} [m]	6,5										
L _{libre} [m]	0,0										
L _{subto} [m]	6,5										
D ₅₀ [m]	0,127										
N _F [m]	3,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{aportico} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	QL
1	0.00-3.50	Lleno Antrópico	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	50-145	97,50	136,15	20,42	156,58
2	3.50-5.50	Lleno heterogéneo	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	2,0	5,5	2,0	95-190	142,50	113,71	17,06	130,77
3	5.50-6.50	Depósito aluvial fino	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	1,0	6,5	1,0	95-240	167,50	66,83	10,02	76,85
						6,5			316,69	47,50	364,20
Pt [kN]	316,692										
P [l]	32,32										

Proyecto		3106 PARQUE BIBLIOTECA									
ID	Microplote 83										
L _{total} [m]	6,5										
L _{libre} [m]	0,0										
L _{subto} [m]	6,5										
D ₅₀ [m]	0,127										
N _F [m]	3,0										
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{aportico} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	QL
1	0.00-3.50	Lleno Antrópico	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	50-145	97,50	136,15	20,42	156,58
2	3.50-5.50	Lleno heterogéneo	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	2,0	5,5	2,0	95-190	142,50	113,71	17,06	130,77
3	5.50-7.50	Depósito aluvial fino	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	2,0	7,5	1,0	95-240	167,50	66,83	10,02	76,85
						6,5			316,69	47,50	364,20
Pt [kN]	316,692										
P [l]	32,32										

Figura 76. FHWA proyecto 3106

Proyecto		3110 CASA PRIETO GÁVIRIA									
ID	Microplote MPP										
L _{total} [m]	7,0										
L _{libre} [m]	0,0										
L _{subto} [m]	7,0										
D ₅₀ [m]	0,305										
N _F [m]	3,0										
Tipo Inyección	Tipo B <i>Inyección única presiones menores de 145 psi</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{aportico} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	QL
1	0.00-9.00	Saprolito	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	9,0	9,0	7,0	35-95	65,00	435,69	65,35	501,04
						7,0			435,69	65,35	501,04
Pt [kN]	435,689										
P [l]	44,46										

Figura 77. FHWA proyecto 3110

Proyecto		3113 ESTRIBO PUENTE RIONEGRO									
ID	Microplote MP 4 estribo derecho										
L _{total} [m]	15,0										
L _{libre} [m]	0,0										
L _{subto} [m]	15,0										
D ₅₀ [m]	0,114										
N _F [m]	2,0										
Tipo Inyección	Tipo A <i>Inyección Gravedad</i>										
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{aportico} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{lp}	QL
1	0.00-12.00	Arena	Arena con algo de limos fina, suelta, con densidad media o baja	12,0	12,0	12,0	70-145	107,50	463,22	69,48	532,70
2	12.00-16.50	Arena pasando a lim	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	4,5	16,5	3,0	50-120	85,00	91,57	13,73	105,30
						15,0			554,78	83,22	638,00
Pt [kN]	554,785										
P [l]	56,61										

Figura 78. FHWA proyecto 3113

Proyecto		3114 PINARES DEL CARMELO										
ID	Microplote MP-P-17											
L _{total} [m]	15,0											
L _{libre} [m]	0,0											
L _{subto} [m]	15,0											
D ₀ [m]	0,114											
NF [m]	3,0											
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{absorbo} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{ip}	QL	
1	0.00-6.45	Suelos Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	6,5	6,5	6,5	50-145	97,50	225,82	33,87	259,69	
2	6.45-15.0	Suelos Residual	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	8,6	15,0	8,6	95-190	142,50	437,50	65,62	503,12	
3	10.75-16.25	Limo	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	5,5	20,5	0,0	95-190	142,50	0,00	0,00	0,00	
							15,0		663,32	99,50	762,82	
P _t [kN]		663,318										
P _i [l]		67,69										
Proyecto		3114 PINARES DEL CARMELO										
ID	Microplote MP-F-4											
L _{total} [m]	15,0											
L _{libre} [m]	0,0											
L _{subto} [m]	15,0											
D ₀ [m]	0,114											
NF [m]	17,0											
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{absorbo} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{ip}	QL	
1	0.00-9.45	Suelos Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	9,5	9,5	9,5	50-145	97,50	330,85	49,63	380,48	
2	9.45-18.4	Suelos Residual	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	9,0	18,4	5,6	95-190	142,50	283,99	42,60	326,59	
3	10.75-16.25	Limo	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	5,5	23,9	0,0	95-190	142,50	0,00	0,00	0,00	
							15,0		614,84	92,23	707,07	
P _t [kN]		614,842										
P _i [l]		62,74										
Proyecto		3114 PINARES DEL CARMELO										
ID	Microplote MP-B-13											
L _{total} [m]	15,0											
L _{libre} [m]	0,0											
L _{subto} [m]	15,0											
D ₀ [m]	0,114											
NF [m]	18,0											
Tipo Inyección	Tipo D <i>Inyección en dos o más pasos a presiones mayores a 290 psi, IRS</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{absorbo} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{ip}	QL	
1	0.00-9.45	Suelos Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	9,5	9,5	9,5	50-145	97,50	330,85	49,63	380,48	
2	9.45-20.40	Suelos Residual	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	11,0	20,4	5,6	95-190	142,50	283,99	42,60	326,59	
3	10.75-16.25	Limo	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	5,5	25,9	0,0	95-190	142,50	0,00	0,00	0,00	
							15,0		614,84	92,23	707,07	
P _t [kN]		614,842										
P _i [l]		62,74										

Figura 79. FHWA proyecto 3114

Proyecto		3135 CASA CAMILO MEDINA										
ID	Microplote MP MPP											
L _{total} [m]	9,0											
L _{libre} [m]	0,0											
L _{subto} [m]	9,0											
D ₀ [m]	0,198											
NF [m]	2,5											
Tipo Inyección	Tipo B <i>Inyección única presiones menores de 145 psi</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H _i [m]	H [m]	L _g [m]	α _{absorbo} [kPa]	α _{disaño} [kPa]	P _i [kN]=Q _{is}	Q _{ip}	QL	
1	0.00-0.00	Flujos de lodos	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	0,0	0,0	0,0	35-95	65,00	0,00	0,00	0,00	
2	0.00-7.00	Suelo residual	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	7,0	7,0	7,0	70-190	130,00	566,40	84,96	651,35	
3	7.00-9.00	Material rocoso	Shales blandos, pocos signos de meteorización	2,0	9,0	2,0	N.A.	377,50	469,92	70,49	540,41	
							9,0		1036,32	155,45	1191,76	
P _t [kN]		1036,317										
P _i [l]		105,75										

Figura 80. FHWA proyecto 3135

Proyecto		3136 CASA FEDERICO MEDINA										
ID		Microplote MP-MPP										
L_{total} [m]	9,0											
L_{libre} [m]	0,0											
L_{subto} [m]	9,0											
D_o [m]	0,198											
NF [m]	2,5											
Tipo Inyección	Tipo A <i>Inyección Gravedad</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_e [m]	α_{aportico} [kPa]	α_{diseño} [kPa]	P_i [kN]=Q_{is}	Q_{ip}	Q_L	
1	0.00-0.00	Flujos de lodos	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	0,0	0,0	0,0	35-70	52,50	0,00	0,00	0,00	
2	0.00-7.00	Suelo residual	Limo y arcilla con algo de arenas duros, de consistencia densa	7,0	7,0	7,0	50-120	85,00	370,34	55,55	425,89	
3	7.00-9.00	Materia rocosa	Shales blandos, pocos signos de meteorización	2,0	9,0	2,0	205-550	377,50	469,92	70,49	540,41	
						9,0			840,26	126,04	966,30	
P_i [kN]	840,257											
P [t]	85,74											

Figura 81. FHWA proyecto 3136

Proyecto		3144 RIO DEL ESTE										
ID		Microplote MP-MP1										
L_{total} [m]	18,0											
L_{libre} [m]	0,0											
L_{subto} [m]	18,0											
D_o [m]	0,114											
NF [m]	N.S.E											
Tipo Inyección	Tipo A <i>Inyección Gravedad</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_e [m]	α_{aportico} [kPa]	α_{diseño} [kPa]	P_i [kN]=Q_{is}	Q_{ip}	Q_L	
1	0.00-3.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	3,5	3,5	3,5	35-70	52,50	65,98	9,90	75,88	
2	3.50-11.50	Saprolito	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	8,0	11,5	8,0	35-70	52,50	150,82	22,62	173,44	
3	11.5-20.0	Roca Descompuest	Gravas con algo de arenas, densidad media a alta	8,5	20,0	8,5	95-265	180,00	420,13	63,02	483,15	
						18,0			636,93	95,54	732,46	
P_i [kN]	636,925											
P [t]	64,99											

Proyecto		3144 RIO DEL ESTE										
ID		Microplote MP-MP2										
L_{total} [m]	15,0											
L_{libre} [m]	0,0											
L_{subto} [m]	15,0											
D_o [m]	0,114											
NF [m]	0,4											
Tipo Inyección	Tipo A <i>Inyección Gravedad</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_e [m]	α_{aportico} [kPa]	α_{diseño} [kPa]	P_i [kN]=Q_{is}	Q_{ip}	Q_L	
1	0.00-0.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	0,5	0,5	0,5	35-70	52,50	9,43	1,41	10,84	
2	0.50-6.50	Saprolito	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	6,0	6,5	6,0	35-70	52,50	113,11	16,97	130,08	
3	11.5-20.0	Roca Descompuest	Gravas con algo de arenas, densidad media a alta	8,5	15,0	8,5	95-265	180,00	549,40	82,41	631,81	
						15,0			671,94	100,79	772,73	
P_i [kN]	671,936											
P [t]	68,56											

Proyecto		3144 RIO DEL ESTE										
ID		Microplote MP-MP3										
L_{total} [m]	15,0											
L_{libre} [m]	0,0											
L_{subto} [m]	15,0											
D_o [m]	0,114											
NF [m]	11,8											
Tipo Inyección	Tipo A <i>Inyección Gravedad</i>											
Estrato N°	Profundidad [m]	Estrato	Tipo	H_i [m]	H [m]	L_e [m]	α_{aportico} [kPa]	α_{diseño} [kPa]	P_i [kN]=Q_{is}	Q_{ip}	Q_L	
1	0.00-5.50	Suelo Residual	Limo y arcilla con algo de arenas blandos, de mediana plasticidad	5,5	5,5	5,5	35-70	52,50	103,69	15,55	119,24	
2	5.50-20.0	Roca Descompuesta	Gravas con algo de arenas, densidad media a alta	14,5	20,0	9,5	95-265	180,00	614,03	92,11	706,14	
3	11.5-20.0	Roca Descompuesta	Gravas con algo de arenas, densidad media a alta	8,5	28,5	0,0	95-265	180,00	0,00	0,00	0,00	
						15,0			717,72	107,66	825,38	
P_i [kN]	717,719											
P [t]	73,24											

Figura 82. FHWA proyecto 3144

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barba G, A. (2012). *Micropilotes en cimentaciones, Trabajo fin de grado, Escuela Universitaria politécnica grado Ingeniero Civil*
- Barreto, A. (2011). *Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas. Fórmulas analíticas y ensayos de carga. Tesis de maestría Ingeniería Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.*
- Bustamante, M., & Doix, B. (1985). *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés. Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 75-92.*
- Camapum de Carvalho, J. Beneveli, R.M. Silva, C.M. Ferreira, E.S. Fernandes, R.M. (2005). *Reflexão sobre a análise de resultados de provas de carga estática. II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. UFG, Goiânia-GO*
- Camapum de Carvalho, J. Medeiros, C. Van Newton, H. González V, Y. Lara V, L / Fecha sin identificar. *Considerações sobre a análise dos resultados de provas de carga estáticas.*
- Camapum de Carvalho, J. Medeiros, C. De Aquino, F.R. Andrade, L. Bezerra, N.M. Rocha, P.J; (2009). *Análises dos Resultados de Provas de Carga Estáticas sobre Fundações Profundas. Brasília-DF, Brasil: Universidade de Brasília.*
- Díaz-Segura, E. (2013). *Método simplificado para la estimación de la carga última de pilotes sometidos a carga vertical axial en arenas, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.*
- Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras. (2005). *Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera. España.*
- Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras. (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera. España.*
- El Hadi Drbe, O. (2013). *Investigation of Hollow Bar Micropiles in Cohesive Soil. University of Western Ontario - Electronic Thesis and Dissertation Repository.*
- El Hadi Drbe, O. (2014). *Axial Monotonic and Cyclic Compression Behaviour of Hollow Bar Micropiles. University of Western Ontario - Geotechnical Testing Journal.*
- FHWA. (2005). *Micropile Design and Construction. USA.*
- González, A., (1999). *Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el Spt. X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana - SCI -SCG – 1999.*
- Han, J. Ye, S-L. (2008). *A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tensión. Memorial University of New Foundland.*
- Hernández del Pozo, J C. Ocete Ruiz, I. Lamas, F. Hernández Garvayo, J C. *Micropilotes inyectados - Técnica y Cálculo, (Fecha sin definir), Publicación sin definir.*
- Ibañez, L. (2008). *Pruebas de carga no destructivas en pilotes. Departamento de Ing. Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas, Cuba.*

- Londoño, J.E (2001). *Aporte a los sistemas de pilotes, nuevos métodos de análisis y evaluación de aspectos constructivos. Trabajo dirigido de grado. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.*
- Lopes, F. (2006). *Análise de provas de carga estática em estacas pré-moldadas instrumentadas em depósitos argilosos. Tese de doutorado. Universidade federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.*
- Maia, M. Telo, F. Ribeiro, K. De Carvalho, D. (2004) *Provas de carga em estacas pré-moldadas ensaiadas em areias porosas, universidade federal de Lavras. Revista Escola Minas vol.57 no.4 Ouro Preto Oct./Dec. 2004.*
- Mendoza, C. Ramos, A. Cunha, R. Lizcano, A. *Análisis del proceso constructivo y variabilidad de parámetros geotécnicos en la capacidad de carga de micropilotes usando elementos finitos aleatorios.*
- Ministerio del Transporte y el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, Norma Colombiana de diseño de Puentes – LRFD - CCP-14, 2014).
- Misra, A. Chen, C-H. (2003). *Analytical solution for micropile design under tension and compression. University of Missouri-Kansas City, Kansas City, Missouri, U.S.A. Geotechnical and Geological Engineering 22: 199–225, 2004. 199 # 2004 Kluwer Academic Publishers. Netherlands.*
- Moreno, J F. Hoyos, D. Vélez, A (2003). *Sistema de cimentación en micropilotes, Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.*
- Ortiz Hermosillo, R. Tesis de doctorado (2009). *Efecto de la presión de inyección en el comportamiento axial de micropilotes instalados en suelos blandos.*
- Pearlman, S. L., and Wolosick, J. R. (1992), "Pin Piles for Bridge Foundations," *Proceedings, 9th Annual International Bridge Conference, Pittsburgh, Pennsylvania.*
- Quevedo, G. (2015). *Capacidad portante de pilotes empotrados en rocas considerando su aporte a fricción, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara. Cuba.*
- Qian, Y. Yu, Y. Lu, T. Wang, R. (2016). *Research on influence of adjacent clay-layer thickness for the failure behavior and performance of the meep pile under vertical compression. Journal of the Balkan Tribological Association Vol. 22, No 2A-II, 2151–2159.*
- Raddatz, D. Miranda, R. Taiba, O. (2014). *Diseño y aplicación de pilotes CFA para una central eléctrica en Coronel, Chile.*
- Romana, M. (2003). *Micropilotes – uso en recalces. Conferencia en el "II Curso sobre Recalces, Inclusiones, Inyecciones y Jet-Grouting" organizado por STMR en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Valencia*
- Ruge, J C. Pinto da Cunha, R. Rondón, H A. (2014). *Simulación de pruebas de carga en pilotes usando un modelo constitutivo hipoplástico. Revista EIA, ISSN 1794-1237 / Año XI / Volumen 11 / Edición N. 21 / Enero-junio 2014 / pp. 171-183 Escuela de Ingeniería de Antioquia—EIA—, Envigado (Colombia).*
- Xu, F. Zhang, Q Q. Li, P L. Wang K., Zhang, S. He, P. (2017). *Response of a single pile subjected to tension load by using softening models. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 54, No. 1, March, 2017. Russian Original No. 1, January-February.*