ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR LA MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN DE ANCLAJES ACTIVOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.

MARÍA ANGÉLICA ALARCÓN TARAZONA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA
2017

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR LA MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN DE ANCLAJES ACTIVOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.

MARÍA ANGÉLICA ALARCÓN TARAZONA

Trabajo de grado modalidad aplicación para optar al título de:
Maestría en Geotecnia.

Director:
VLADIMIR ERNESTO MERCHAN JAIMES
PhD en ingeniería del terreno.

Codirectores:
CARLOS A. BUENAHORA BALLESTEROS
M Sc en geotecnia.

LUZ STELLA BRAVO MOLINA
M Sc en geotecnia.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA
2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me ha dado la vida, fortaleza y salud para poder realizar este proyecto de grado.

A mi familia, principalmente a mis padres quienes son mi apoyo, pilar y ejemplo para lograr cada una de las metas propuestas en mi vida, quienes sin su ayuda no se hubiese podido realizar este logro.

A mi esposo, quien fue una ayuda fundamental para la realización del presente proyecto, debido a que siempre fue el gran motor para lograr lo que tengo.

A los Ingenieros Carlos Buenahora y Luz Stella Bravo quienes siempre me apoyaron durante la ejecución de todo el proyecto, brindando sus conocimientos, tiempo y apoyo en todo lo que necesitaba.

Al profesor Vladimir Merchán quien me colaboro y guío para dar por finalizado este gran logro en mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 18
1 OBJETIVOS 24
1.1 OBJETIVO GENERAL 24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 24
2 GENERALIDADES 25
2.1 DEFINICIONES 25
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ANCLAJES 34
2.2.1 Tipos de anclajes según su vida útil. 35
2.2.1.1 Anclajes provisionales. 35
2.2.1.2 Anclajes permanentes. 36
2.2.2 Tipo de anclajes según su mecanismo de sostenimiento. 37
2.2.2.1 Anclajes inyectados a gravedad. 37
2.2.2.2 Anclajes inyectados a presión. 38
2.2.2.3 Anclajes post-inyectados. 38
2.2.3 Tipo de anclaje según la dirección de perforación. 39
2.2.3.1 Anclajes descendentes. 39
2.2.3.2 Anclajes ascendentes. 40
2.2.4 Tipo de anclaje según la longitud libre de la barra. 40
2.2.4.1 Anclajes de juego libre. 40
2.2.4.2 Anclajes bloqueados. 41
2.2.5 Anclajes según sus aplicaciones. 42
2.2.5.1 Estabilización de taludes. 42
2.2.5.2 Arriostramiento de estructuras de contención. 43
2.2.5.3 Absorción de esfuerzos en cimentaciones. 44
2.2.5.4 Refuerzo de estructuras. 45
2.2.6 Anclajes según su forma de trabajo. 46
2.2.6.1 Anclajes activos. 46
2.2.6.2 Anclajes pasivos. 47

3 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 47
3.1 JUSTIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS 47
3.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO.....48
3.3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO 50
3.4 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LOS ENSAYOS.....51
3.4.1 Fase I: 51
3.4.2 Fase II. 53
3.4.3 Fase III. 54
3.4.4 Fase IV. 57
4 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REMI Y MASW.....61
4.1 FASE I.....62
4.1.1 Resultados de los ensayos realizados antes de la perforación de anclajes. 62
4.2 FASE II.....63
4.2.1 Resultados de los ensayos realizados durante la perforación del anclaje. 64
4.3 FASE III.....65
4.3.1 Resultados ensayo después del tensionamiento de la primer fila de anclajes. 65
4.4 FASE IV 66
4.4.1 Resultados ensayo después del tensionamiento de la totalidad de los anclajes. 66
5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS 67
5.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS ANTES DE LA PERFORACIÓN 69
5.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DURANTE LA PERFORACIÓN 69
5.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS CON UNA FILA DE ANCLAJES TENSIONADA 69
5.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS CON LA TOTALIDAD DE LOS ANCLAJES TENSIONADOS 70

6 SIMULACIÓN NUMÉRICA CON PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS 74
6.1 FASE I 75
6.2 FASE II 76
6.3 FASE III 79
6.4 FASE IV 82
7 CONCLUSIONES 86
8 RECOMENDACIONES 88
BIBLIOGRAFÍA 89
ANEXOS 92

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Fallas de taludes en obras. 18
Figura 2. Estabilización de taludes en obras. 19
Figura 3. Zona de amenaza sísmica aplicable para edificaciones en Colombia. ... 20
Figura 4. Daños presentados en procesos de estabilización en viviendas aledañas. Daños de poca importancia en elementos no estructurales. 21
Figura 5. Daños presentados en procesos de estabilización en viviendas aledañas. Daños importantes en elementos estructurales. 22
Figura 6. Daños presentados en procesos de estabilización en viviendas aledañas. Daños importantes en elementos no estructurales. 23
Figura 7. Anclajes construidos con torones y barras de acero. 25
Figura 8. Bujes usados para el tensionamiento de los anclajes activos 26
Figura 9. Bulbo en los anclajes activos 27
Figura 10. Concreto lanzado para los anclajes pasivos. 27
Figura 11. Cuña usada en los anclajes activos 28
Figura 12. Principales partes a nivel superficial de los anclajes activos. 28
Figura 13. Preparación de la lechada para dar inicio al proceso de inyección. 29
Figura 14. Lechada usada para el proceso de inyección de anclajes y micropilotes. 30
Figura 15. Armado de micropilotes usados para la estabilidad de taludes. 30
Figura 16. Proceso de perforación de un anclaje por medio de maquinaria. 31
Figura 17. Proceso de tensionamiento para un anclaje. 32
Figura 18. Proceso de excavación por medio de trincheras. 33
Figura 19. Separadores usados en la instalación de anclajes. 33
Figura 20. Partes de los anclajes activos. Zona libre. 34
Figura 21. Anclajes provisionales. 35
Figura 22. Anclajes permanentes. 36
Figura 23. Geometría de un anclaje inyectado a gravedad. 37
Figura 24. Geometría de un anclaje inyectado a presión. 38

Figura 25. Geometría de un anclaje post-inyectado. 39
Figura 26. Dirección de perforación de los anclajes descendentes. 39
Figura 27. Dirección de perforación de los anclajes ascendentes. 40
Figura 28. Anclajes de juego libre 41
Figura 29. Anclajes bloqueados 41
Figura 30. Aplicaciones de anclajes para la estabilización de taludes. 42
Figura 31. Aplicación de los anclajes para el arriostramiento de estructuras de contención. 43
Figura 32. Aplicación de los anclajes en la absorción de esfuerzos en las cimentaciones. 44
Figura 33. Aplicación de los anclajes como refuerzo de estructuras. 45
Figura 34. Anclajes activos. 46
Figura 35. Anclajes pasivos. 47
Figura 36. Ubicación general obra torres de Monterredondo II. 49
Figura 37. Ubicación especifica obra torres de Monterredondo II. 49
Figura 38. Ubicación de los costados en el lote Torres de Monterredondo II. 50
Figura 39. Propiedades del suelo del proyecto Monterredondo II. 51
Figura 40. Instalación de línea sísmica en el proyecto Monterredondo II. 52
Figura 41. Elementos como platina y porra utilizados en el ensayo MASW. 52
Figura 42. Realización de ensayo MASW en la fase I del proyecto. 53
Figura 43. Toma de datos por medio de ensayo REMI usando como fuente la perforación de un anclaje activo. 54
Figura 44. Recopilación de datos a través de un equipo computacional y un sismógrafo. 54
Figura 45. Pantalla costado norte, tensionada la primera fila de anclajes. 55
Figura 46. Línea sísmica tendida en la Fase III del proyecto. 55
Figura 47. Realización del ensayo MASW en la fase III del proyecto. 56
Figura 48. Minicargador utilizado como fuente para la obtención de datos mediante ensayo REMI. 56

Figura 49. Recolección de datos a través del sismógrafo y un equipo computacional. 57
Figura 50. Pantalla costado norte, tensionada la totalidad de la misma. 58
Figura 51. Línea sísmica tendida en la Fase IV del proyecto. 58
Figura 52. Realización del ensayo MASW en la fase IV del proyecto. 59
Figura 53. Trabajo de la obra utilizado como fuente para la obtención de datos mediante ensayo REMI. 59
Figura 54. Recolección de datos a través del sismógrafo y un equipo computacional durante la fase IV. 60
Figura 55. Tendido de los electrodos para el ensayo de la tomografía eléctrica. ..60
Figura 56. Tendido del cable para el ensayo de la tomografía eléctrica. 61
Figura 57. Unidad central y equipo computacional usado en el ensayo de tomografía eléctrica. 61
Figura 58. Resultados del ensayo REMI antes de iniciar perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 63
Figura 59. Resultados del ensayo MASW antes de iniciar perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 63
Figura 60. Resultados del ensayo REMI durante el proceso de perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 64
Figura 61. Resultados del ensayo MASW durante el proceso de perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 64
Figura 62. Resultados del ensayo REMI después de tensionada la primera fila de anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 65
Figura 63. Resultados del ensayo MASW después de tensionada la primera fila de anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 65
Figura 64. Resultados del ensayo REMI después de tensionada la totalidad de los anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 66
Figura 65. Resultados del ensayo MASW después de tensionada la totalidad de los anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados. 66
Figura 66. Tomografía eléctrica tomada con la totalidad de la pantalla anclada. ..67

Figura 67. Comparación entre resultados entre los ensayos REMI y MASW. 67
Figura 68. Clasificación de los perfiles del suelo según la NSR-10. 68
Figura 69. Resultados de los ensayos antes, durante y después de la perforación. 71
Figura 70. Grafica de la velocidad vs la profundidad de todas las fases. 72
Figura 71. Cálculo de la frecuencia natural vs frecuencia del equipo de perforación. 73
Figura 72. Comparación de resultados antes y durante el proceso de perforación con el ensayo MASW. 73
Figura 73. Creación de materiales para cada una de las fases. 75
Figura 74. Propiedades del suelo en la Fase I. 76
Figura 75. Materiales asignados en la Fase I en PLAXIS 2D. 76
Figura 76. Materiales asignados en la Fase II en PLAXIS 2D. 77
Figura 77. Resultados de la deformación de la malla en la fase II. 77
Figura 78. Resultados de los desplazamientos totales en la fase II. 78
Figura 79. Propiedades del suelo en la Fase III. 79
Figura 80. Materiales asignados en la Fase III en PLAXIS 2D. 80
Figura 81. Resultados de la deformación de la malla en la fase III. 80
Figura 82. Resultados de los desplazamientos totales en la fase III. 81
Figura 83. Propiedades del suelo en la Fase IV. 82
Figura 84.Parámetros de los anclajes. 82
Figura 85. Materiales asignados en la Fase IV en PLAXIS 2D. 83
Figura 86. Resultados de la deformación de la malla en la fase IV. 83
Figura 87. Resultados de los desplazamientos totales en la fase IV. 84
Figura 88. Desplazamientos verticales en cada una de las fases. 85
Figura 89. Secciones típicas de los micropilotes 92
Figura 90. Principales partes de los micropilotes. 93
Figura 91. Proceso de inyección de los micropilotes. 94
Figura 92. Proceso de reinyección en los micropilotes. 95
Figura 93. Micropilotes en procesos de inyecciones repetitivas. 96

Figura 94. Aplicación de los micropilotes en el recalce de pilas en puentes. 97
Figura 95. Aplicación de los micropilotes en los procesos de excavación de edificaciones.....98
Figura 96. Aplicación de los micropilotes en la estabilización de taludes o laderas. 99
Figura 97. Aplicación de los micropilotes en la estabilización de las bocas de entrada a los túneles. 99
Figura 98. Aplicación de los micropilotes usados como mejoras de suelos en las cimentaciones.....100
Figura 99. Proceso de perforación de los micropilotes con la ayuda de la tubería de perforación. 101
Figura 100. Perforación del micropilote con la ayuda de la tubería de perforación y de revestimiento. 102
Figura 101. Retiro de la tubería de perforación e instalación del refuerzo del micropilote. 103
Figura 102. Extracción de la tubería de perforación.....103
Figura 103. Proceso de inyección de un micropilote.....104
Figura 104. Partes de los anclajes pasivos.....107
Figura 105. Proceso de perforación de los anclajes pasivos. 109
Figura 106. Instalación del acero de refuerzo en los anclajes pasivos.....110
Figura 107. Proceso de inyección de los anclajes pasivos. 110
Figura 108. Proceso de fijación del anclaje pasivo con la ayuda de platina y tuerca. 111
Figura 109. Partes del anclaje activo. 112
Figura 110. Superficie de falla crítica y la superficie de falla potencial en un talud. 113
Figura 111. Primer anclaje pretensado en presa Cheurfas en Argelia. 115
Figura 112. Aplicación de los anclajes activos en la estabilización de taludes. ...116
Figura 113. Aplicación de los anclajes activos en túneles y excavaciones. 116

Figura 114. Aplicación de los anclajes activos en la construcción de diques y presas. 116
Figura 115. Aplicación de los anclajes activos para la estabilización de cimientos. 117
Figura 116. Dispositivos auxiliares utilizados en los anclajes activos..... 118
Figura 117. Comparación entre un almacenamiento correcto e incorrecto de los tirantes..... 119
Figura 118. Esquema general del armado de los anclajes activos..... 120
Figura 119. Proceso de perforación en los anclajes activos. 120
Figura 120. Proceso de instalación de los tirantes en anclajes activos. 122
Figura 121. Proceso de inyección en anclajes activos. 123
Figura 122. Proceso de inyección en anclajes activos. 124
Figura 123. Anclaje activo y ubicación de pantalla de concreto. 125
Figura 124. Esquema del procedimiento de tensionamiento de los anclajes. 126
Figura 125. Tipologías de gatos al realizar tensionamiento. 127
Figura 126. Proceso de tensionamiento de los anclajes activos en función de su posición. 127
Figura 127. Proceso de excavación y construcción de pantallas ancladas. 129
Figura 128. Elementos de una onda. 135
Figura 129. Ondas de reflexión y refracción. 136
Figura 130. Interferencia constructiva y destructiva de las ondas. 137
Figura 131. Difracción de las ondas..... 138
Figura 132. Ondas de cuerpo: Ondas primarias. 139
Figura 133. Ondas de cuerpo: Ondas secundarias. 140
Figura 134. Forma de propagación de las ondas Love. 142
Figura 135. Programación de las ondas Rayleigh..... 142
Figura 136. Proceso de ejecución de un ensayo MASW. 143
Figura 137. Ensayo crosshole esquemáticamente..... 146
Figura 138. Esquema general de 2 y 3 sondeos usando el ensayo CrossHole... 147
Figura 139. Ensayo Up-Hole y Down-Hole. 148

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN EN EXCAVACIONES ..……92
ANEXO B. ENSAYOS GEOFÍSICOS……..129

RESUMEN

TÍTULO:
ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR LA MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN DE ANCLAJES ACTIVOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.*

AUTOR:
MARÍA ANGÉLICA ALARCÓN TARAZONA **

PALABRAS CLAVES:
Anclajes pasivos, anclajes activos, micropilotes, REMI, MASW, tomografía eléctrica.

CONTENIDO:

Colombia es un país que en los últimos años ha venido presentando un crecimiento exponencial en la construcción de viviendas, producto del desarrollo que presenta nuestro país con el paso de los días.

A raíz de la necesidad que surge actualmente de construir edificios de gran altura, debido al costo elevado de los terrenos aptos para la construcción, se da la necesidad de realizar bases estructurales significativamente profundas, con el fin de lograr capacidades portantes óptimas para el desarrollo de los proyectos; y como consecuencia el uso de procesos de estabilización de taludes.

Debido a lo expuesto anteriormente se pretende estudiar el comportamiento del suelo debido a los efectos generados por el uso de la maquinaria de perforación en los anclajes activos. Dentro de los temas a tratar se presentarán varios sistemas de estabilización de excavaciones y además las principales características de los ensayos geofísicos.

Adicionalmente, se realizarán una serie de ensayos en una obra que se encuentre en fase de construcción de los anclajes activos y con ello una serie de mediciones con ensayos geofísicos como son el REMI, MASW y tomografía eléctrica, para así determinar las afectaciones que puede generar la intervención del suelo producto de la construcción de anclajes activos.

Finalmente, se realizará una simulación numérica en el programa PLAXIS 2D con el fin observar las deformaciones del suelo durante las diferentes fases de construcción de los anclajes activos.

---

*Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Codirectores: Carlos A Buenahora, Luz Stella Bravo Molina.

ABSTRACT

TITLE:
ANALYSIS OF THE EFECTS OF VIBRATIONS GENERATED BY ACTIVE GROUND ANCHORS CONSTRUCTION MACHINERY ON THE SOIL BEHAVIOR.*

AUTHOR:
MARIA ANGÉLICA ALARCÓN TARAZONA**

KEYWORDS:
Passive ground anchors, active anchors, micropiles, REMI, MASW, electrical resistivity tomography.

CONTENT:

Colombia is a country that in the last years has been presenting an exponential growth on the household construction, product of the country *developement* through the days.

In the wake of the needing that currently arises on building high-rise buildings and because the high cost of suitable for construction pieces of ground, it is mandatory to have significantly deep structural bases, with the point of achieve the development of the *proyect* and the slope stabilization.

Because of the above mentioned, the intention is to study the soil behavior due to the effects generated by the perforation machinery in the active anchors. Into the topics to mention, will be presented some excavation stabilization systems, and the principal features of the geophysical surveys.

Additionally, a series of tests will be performed on a construction in phase of active anchors development and with that measurements with geophysical surveys like the REMI and MASW, to determine the affections of these interventions.

Finally, a numerical simulation will be realized in the PLAXIS 2D program to *observ* the soil deformations during the *diferent phases* of active anchors construction.

---

*Research Work.

** Physical mechanics engineering facult. Civil engineering school. Project director: Vladimir Ernesto Merchan Jaimes. Codirectores: Carlos A Buenahora, Luz Stella Bravo Molina.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años Colombia ha presentado un incremento significativo en la construcción de viviendas producto del desarrollo que presenta nuestro país con el paso de los días. Si a esto se le adiciona el costo elevado de los terrenos aptos para la construcción entonces es allí donde surge la necesidad de generar estructuras de gran altura para así minimizar costos generados por la compra de terrenos. Producto de esto, surge la necesidad de realizar bases estructurales con un nivel de profundidad mayor para así lograr maximizar las ganancias ganando área en los niveles de sótanos y llegando a capacidades portantes óptimas para el desarrollo del proyecto.

Como consecuencia de hacer mayores excavaciones para la construcción de nuevas estructuras se ha observado que los cortes en los taludes han ocasionado que los suelos pierdan confinamiento y con ello la estabilidad de estructuras aledañas a la obra en ejecución se han visto involucradas; y más aún, en aquellas obras que realizan las excavaciones sin un debido proceso de estabilización.

En la figura 1 se observan dos fotografías donde han ocurridos accidentes y tal como se puede ver en ninguna de estas obras se observa un debido proceso para la estabilización de taludes lo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de movimientos o deslizamientos de tierra.

Figura 1. Fallas de taludes en obras.

FUENTE: www.vanguardia.com [en línea]. (Recuperado en 16 marzo 2017). Disponible en http://www.vanguardia.com/judicial/393472-dos-muertos-y-un-obrero-atrapado-deja-caida-de-un-muro-en-bucaramanga.

Aunque en algunas obras no se presenten estabilizaciones de taludes, ya se ha generado de forma global una mayor conciencia en salvaguardar la vida de todas las personas que intervienen en una obra civil, por esto se hace necesario realizar estabilizaciones al terreno con el fin de evitar los inconvenientes expuestos anteriormente.

En la figura 2 se observa la estabilización de taludes de dos obras. Al costado izquierdo se puede apreciar la estabilización por medio de pantallas ancladas y al lado derecho por medio de anclajes pasivos con concreto lanzado.

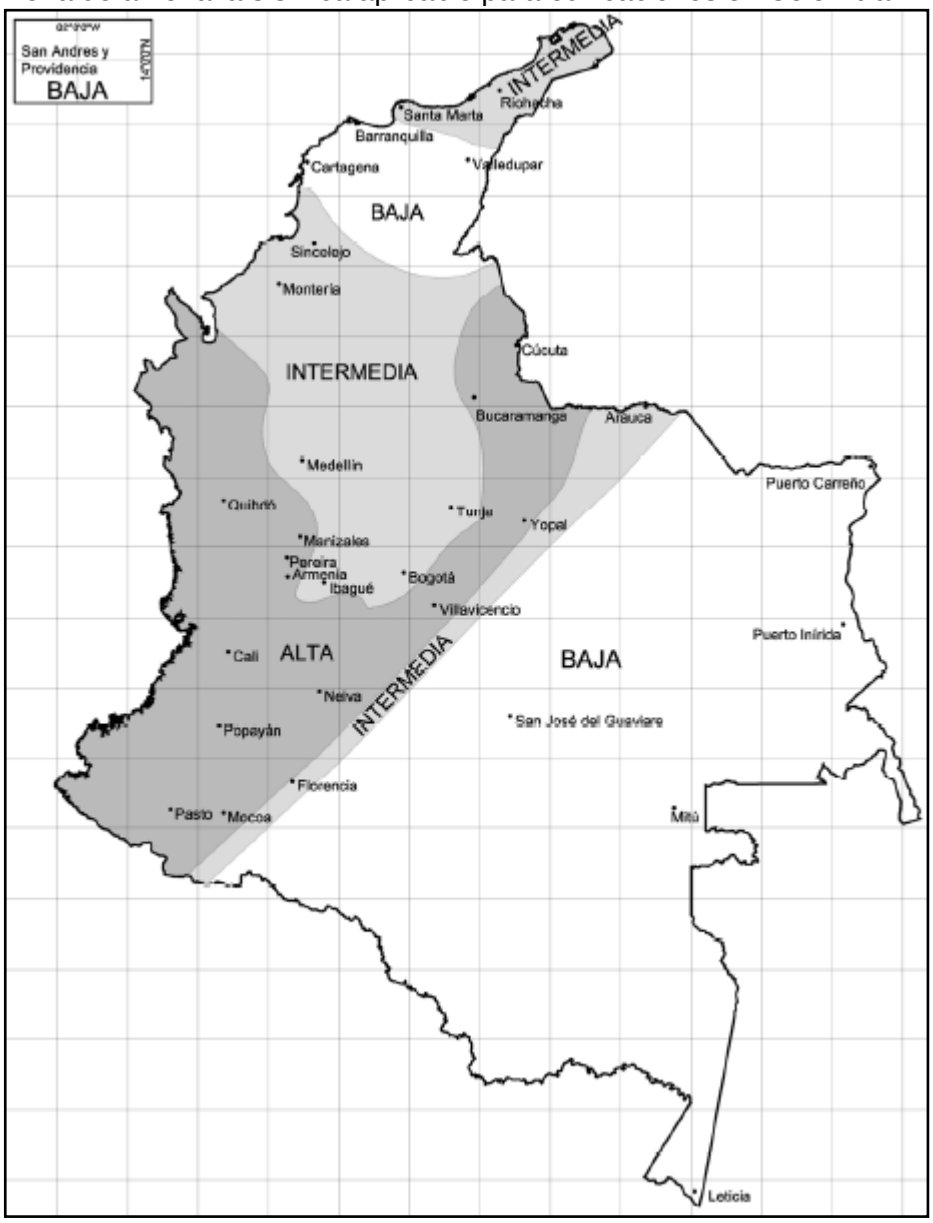
Figura 2. Estabilización de taludes en obras.

Si además de pensar en la perdida de confinamiento del suelo producto de las excavaciones se le adiciona que Colombia se encuentra ubicada en América Latina, siendo esta zona de alto riesgo de desastres naturales ya que es vulnerable de sufrir sismos de gran magnitud y deslizamientos de grandes masas de tierra, consecuencia del constante movimiento de las placas tectónicas que allí se encuentran y que adicionalmente cerca del 18% del territorio nacional se encuentra localizado en zonas de amenaza sísmica alta principalmente la zona de la región andina[1], se hace necesario aun con mayor preocupación el correcto uso de procesos que permitan una estabilización de taludes acorde durante los procesos de excavación ocurridos en obra.

En la figura 3 se observa de modo general las tres diferentes zonas de amenazas sísmicas que presenta Colombia, en las que se encuentra zona de amenaza sísmica baja, intermedia y alta.

[1] CONDE GARZON, J; ALVAREZ PRADA, J. Estudio de estabilidad de un talud ubicado en el barrio Bellavista del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Abril, 2014.

Figura 3. Zona de amenaza sísmica aplicable para edificaciones en Colombia.



FUENTE: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR 10. p-A-17.

Colombia ha presentado de forma muy acelerada un incremento tanto en el diseño como en la construcción de estabilizaciones que permiten garantizar un nivel de seguridad óptimo para el desarrollo de las obras. Como es de esperarse las estabilizaciones han permitido un mayor grado de seguridad y han eliminado en un gran porcentaje el deslizamiento de terrenos lo que ha logrado evitar en gran escala accidentes fatales dentro de la construcción y a su vez llegar a profundidades óptimas para el desarrollo del proyecto.

Sin embargo, con los procesos de estabilización no se ha podido eliminar completamente la problemática, si bien es cierto se han minimizado en gran escala los accidentes que ocurrían cuando no se realizaban procesos de estabilización de taludes en las excavaciones, aun se siguen presentando afectaciones en las estructuras aledañas.

Dentro de las principales afectaciones se encuentra la generación de fisuras o grietas en las viviendas aledañas a la construcción, afectando así tanto elementos estructurales como no estructurales lo que conlleva a costos no previstos en la ejecución de un proyecto.

Los procesos de reparación de estas afectaciones (grietas y fisuras) van desde los arreglos de las viviendas hasta la demolición y nueva construcción, ya que en ocasiones no es suficiente con una reparación, producto de las grandes afectaciones que pueden llegar a presentar los elementos estructurales.

A continuación, se muestran algunas afectaciones que se presentan en viviendas aledañas a la construcción durante y después de los procesos de estabilización. En la figura 4 se puede observar daños de menor importancia en elementos no estructurales.

Figura 4. Daños presentados en procesos de estabilización en viviendas aledañas. Daños de poca importancia en elementos no estructurales.

Como se mencionó anteriormente, hay ocasiones en que las afectaciones son de mayor gravedad y por ende es necesario la demolición total o parcial de las estructuras afectadas. En la figura 5 se observa algunos daños presentados en los muros divisorios durante los procesos de estabilización de taludes los cuales presentan una mayor afectación a los antes mostrados.

Figura 5. Daños presentados en procesos de estabilización en viviendas aledañas. Daños importantes en elementos estructurales.

Finalmente, existen en ocasiones daños a elementos estructurales lo que coloca en riesgo la estabilidad de la estructura y por ende la necesidad de evaluar con cuidado las acciones a tomar en dichas estructuras. A continuación, en la figura 6 se muestran algunos daños generados a los elementos estructurales.

Figura 6. Daños presentados en procesos de estabilización en viviendas aledañas. Daños importantes en elementos no estructurales.

Como se puede observar a pesar de realizar los respectivos procesos de estabilización en los taludes en ocasiones se presentan afectaciones que comprometen la estabilidad de viviendas aledañas a una obra en ejecución.

Es importante aclarar que el estudio que conlleva la estabilidad de un talud es afectado por diferentes factores como puede ser la composición geológica del terreno, si presenta o no nivel freático, su peso propio y movimientos sísmicos que puedan ocurrir[2].

Por tal motivo, el presente documento pretende dar a conocer características, generalidades y procesos constructivos que se llevan en estos sistemas de estabilidad.

Adicionalmente evaluar la posibilidad de que sean estos procesos los que ocasionan las afectaciones en el terreno y por ende daños en estructuras aledañas producto de las vibraciones que estos emiten al suelo. Para llegar a obtener estos resultados se trabajará con ensayos de geofísica los cuales muestran las afectaciones que presenta el suelo, debido a los trabajos de estabilización.

[2] CABALLERO OLARTE, J. Valoración de diferentes opciones para estabilización del talud ubicado en el K8 + 600 en la vía doble calzada Bucaramanga- Cúcuta. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, 2014. p. 2.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar los efectos de las vibraciones generadas por la maquinaria de construcción de anclajes activos en el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo aledaño a las pantallas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los procesos constructivos de mayor uso para la estabilización de excavaciones para edificaciones en el ámbito nacional.

- Estudiar los ensayos geofísicos más utilizados en la caracterización de suelos por medio de ondas sísmicas principalmente MASW y REMI.

- Realizar, analizar y comparar los resultados obtenidos de las ondas generadas por los procesos PIT antes, durante la perforación y después de intervenir el terreno. Lo anterior mediante ensayos de campo con REMI y MASW.

- Estudiar la influencia de los posibles cambios en el módulo de deformación sobre las deformaciones del terreno por efectos del proceso constructivo de anclajes activos.

2 GENERALIDADES

En el siguiente capítulo se tratará sobre algunas definiciones básicas usadas en los diferentes tipos de estabilizaciones que se tratarán en el presente documento. Adicionalmente se describirán las diferentes clasificaciones que les han dado diversos autores a los anclajes.

2.1 DEFINICIONES

A continuación, se realizará una descripción breve sobre las definiciones más comunes usadas en la contención de taludes en obras de excavaciones significativas.

Anclajes: Son estructuras ubicadas en el suelo o roca que tienen como función principal transmitir tensiones al suelo con el fin de lograr una estabilidad del terreno[3]. Son diseñados para trabajar a tensión por medio de un sistema de perforación el cual consiste en dejar fijado el anclaje en dos puntos, uno en la parte interior del terreno y posteriormente fijado a nivel superficial ya sea por medio de pantallas o concreto lanzado[4]. En la figura 7 se observa un anclaje construido por medio de torones al costado izquierdo y al costado derecho un anclaje construido por medio de una varilla de acero.

Figura 7. Anclajes construidos con torones y barras de acero.

[3] FLORES RUGELES, L; HERNANDEZ JOYA, C. Estudio sobre el diseño y construcción de anclajes como elementos de estabilización de taludes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. p. 21.

[4] MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010.p. 6.

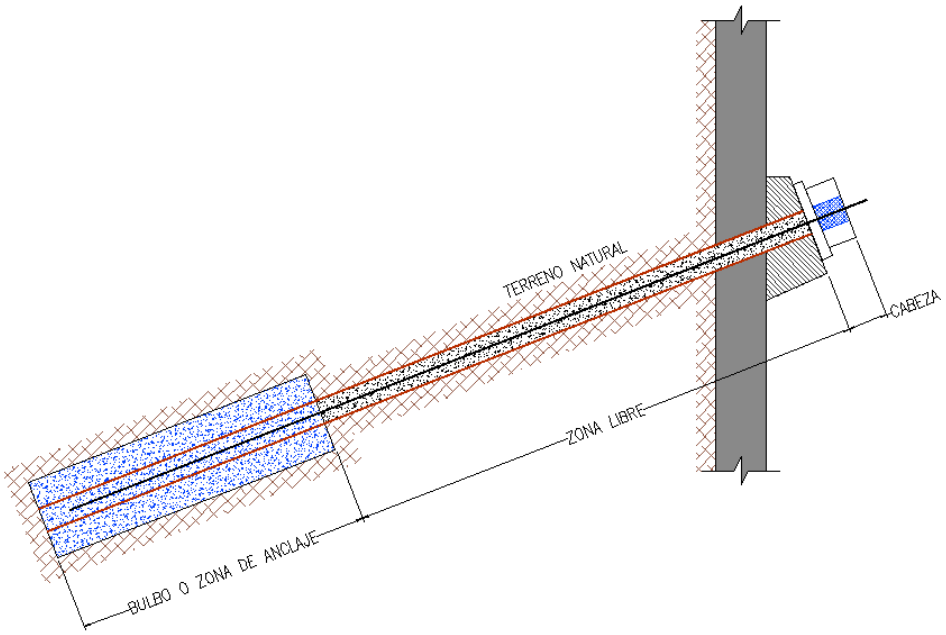
- ✓ **Bujes:** Elemento metálico que se utilizado de soporte para sostener la carga de un anclaje activo a nivel superficial. En la figura 8 se observa los bujes usados para el tensionamiento de los anclajes activos.

Figura 8. Bujes usados para el tensionamiento de los anclajes activos

FUENTE: www.metalcort.com. [En línea]. (Recuperado en 20 marzo 2017). Disponible en www.metalcort.com

- ✓ **Bulbo:** es la parte del anclaje generada por una zona cementada sobre el final del ancla con el fin de trasmitir la carga de tensión al suelo. Generalmente esta parte del anclaje es reinyectado con el fin de obtener una mayor fricción entre el suelo y el anclaje. En la figura 9 se observan las principales partes de los anclajes activos, donde se encuentra la zona de bulbo del ancla.

Figura 9. Bulbo en los anclajes activos



- ✓ **Concreto lanzado:** Es un sistema de colocación de concreto, que se aplica en la obra por compresión neumática a través de una tubería y es proyectado a gran velocidad sobre una superficie requerida. Este concreto presenta un agregado pequeño que forma una mezcla relativamente seca, la cual se consolida a través de la fuerza de impacto y con aditivos. En la figura 10 se observa el proceso de instalación del concreto lanzado.

Figura 10. Concreto lanzado para los anclajes pasivos.

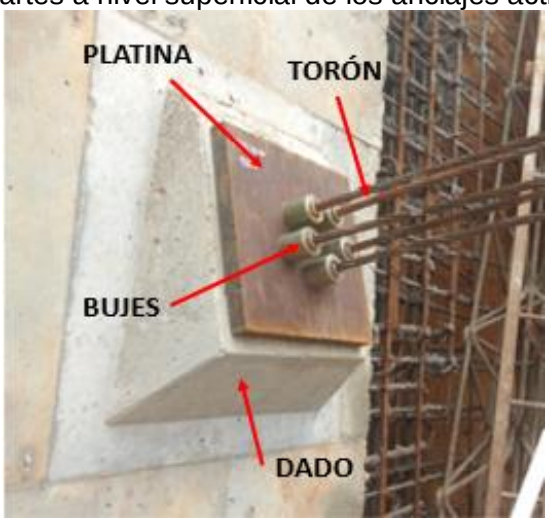
- ✓ **Cuña:** Pieza metálica generalmente conformada por dos o tres partes la cual se inserta dentro del buje y no permite que el anclaje se destensione o pierda su tensionamiento. En la figura 11 se observan las cuñas usadas en los anclajes activos.

Figura 11. Cuña usada en los anclajes activos

FUENTE: www.metalcort.com. [En línea]. (Recuperado en 20 marzo 2017). Disponible en www.metalcort.com.

Dado: Elemento de concreto reforzado ubicado a nivel superficial después de la pantalla, el cual tiene como propósito soportar la carga para posteriormente trasmitir el tensionamiento a la pantalla. En la figura 12 se observa las principales partes a nivel superficial de los anclajes activos donde se pueden apreciar el dado, la platina, los bujes y los torones.

Figura 12. Principales partes a nivel superficial de los anclajes activos.



- ✓ **Inyección:** Es el proceso que permite el llenado de las perforaciones con una mezcla de agua cemento. Existen varios procesos de realizar la inyección que van desde el llenado por gravedad hasta el llenado por medio de máquinas inyectoras. En la figura 13 se observa la preparación de la lechada para poder realizar el proceso de inyección por medio de máquinas inyectoras.

Figura 13. Preparación de la lechada para dar inicio al proceso de inyección.

- ✓ **Lechada:** Es la mezcla de agua cemento usada para el proceso de inyección de los anclajes, el cual tiene como objetivo llenar los vacíos dejados por la perforación para así dejar fijo el anclaje en el suelo. En la figura 14 se observa la fluidez que presenta la lechada usada para el proceso de inyección con el fin de facilitar el llenado. La relación de agua cemento debe estar entre 0.45 a 0.50.

Figura 14. Lechada usada para el proceso de inyección de anclajes y micropilotes.

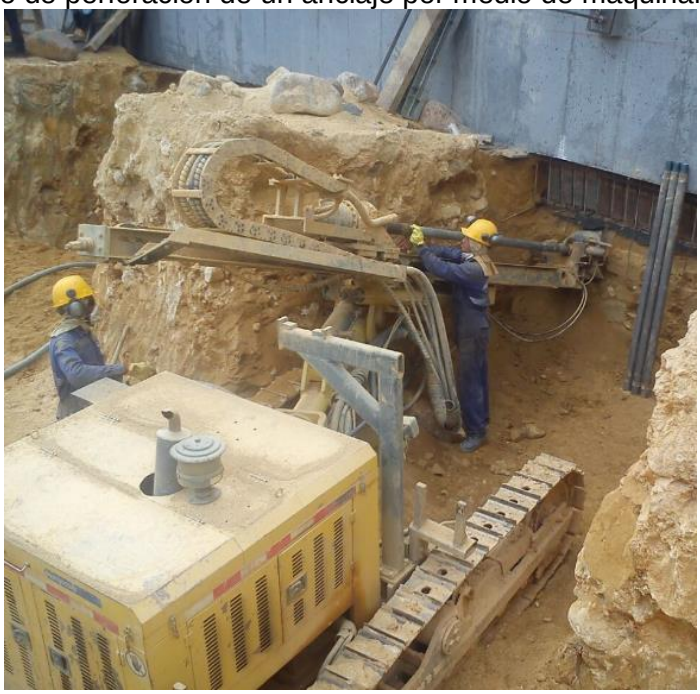
- ✓ **Micropilote:** Es un elemento usado para resistir esfuerzos de tracción, está conformado por barras longitudinales de acero, las cuales son conectadas por medio de varillas en forma de espiral a lo largo de toda su longitud. Al igual que los anclajes este proceso es usado para la estabilidad de taludes. En la figura 15 se observan micropilotes que ya se encuentran armados con el fin de posteriormente ingresarlos en las perforaciones.

Figura 15. Armado de micropilotes usados para la estabilidad de taludes.

- ✓ **Perforación:** Es el proceso en el cual es posible ubicar en el terreno o roca cables (torón), barras corrugadas o micropilotes los cuales son sujetos al

terreno debido a la fricción que se genera entre el suelo producto de la perforación y la lechada inyectada. En la figura 16 se observa el proceso de perforación de un anclaje por medio de maquinaria.

Figura 16. Proceso de perforación de un anclaje por medio de maquinaria.



- ✓ **PIT:** Son los procesos que se llevan a cabo para la construcción de los anclajes activos y corresponde a la perforación, inyección y tensionamiento.

- ✓ **Platina:** Elemento de acero ubicado sobre el dado para servir de transmisión de carga entre este y los bujes. En la figura 12 se observan las principales partes a nivel superficial de los anclajes activos, donde se encuentra la platina.

- ✓ **Tensionamiento:** Es el proceso mediante el cual se carga el anclaje por medio de un equipo de tensionamiento llevando las anclas a la carga de diseño requerida. En la figura 17 se observa el proceso de tensionamiento para un anclaje por medio de un gato hidráulico y una bomba la cual es la encargada de alcanzar la carga de diseño.

Figura 17. Proceso de tensionamiento para un anclaje.

- ✓ **Torón:** Cables compuestos por un conjunto de alambres de acero los cuales son dejados en la parte superficial de los anclajes para poder realizar el proceso de tensionamiento. En la figura 12 se observan las principales partes a nivel superficial de los anclajes activos, donde se encuentra el torón.

- ✓ **Trincheras:** El proceso de modulación de un talud con el fin de no desestabilizarlo en toda su longitud, realizando cortes de aproximadamente 4 metros de ancho por 2 metros de altura. En la figura 18 se observa el proceso de excavación por medio de trincheras.

Figura 18. Proceso de excavación por medio de trincheras.

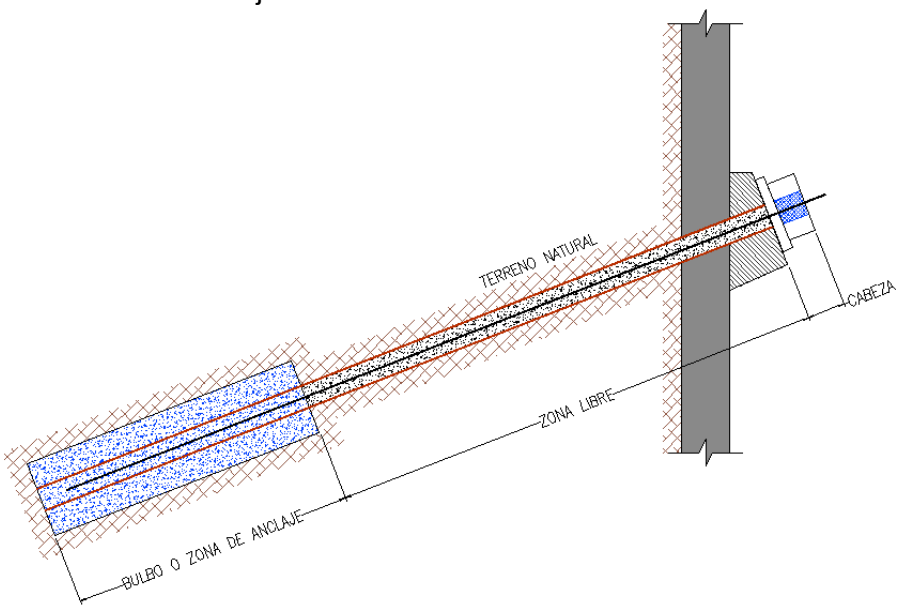
- ✓ **Separador:** Es un elemento usado para aislar o no permitir el contacto entre la tierra y el anclaje, ya que si ocurre, puede dar inicio a un proceso de corrosión al no garantizar recubrimientos mínimos. En la figura 19 se observa los separadores que se deben dejar en la instalación de los anclajes.

Figura 19. Separadores usados en la instalación de anclajes.

- ✓ **Zona libre:** Es una parte de los anclajes activos, la cual se encuentra entre la zona de bulbo y la pantalla anclada, esta zona es realizada con el propósito de llegar a la zona de bulbo requerida en el diseño sin embargo no es

inyectada al igual que la zona final del anclaje. En la figura 20 se observan las principales partes de los anclajes activos, donde se encuentra la zona libre del ancla.

Figura 20. Partes de los anclajes activos. Zona libre.



2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ANCLAJES

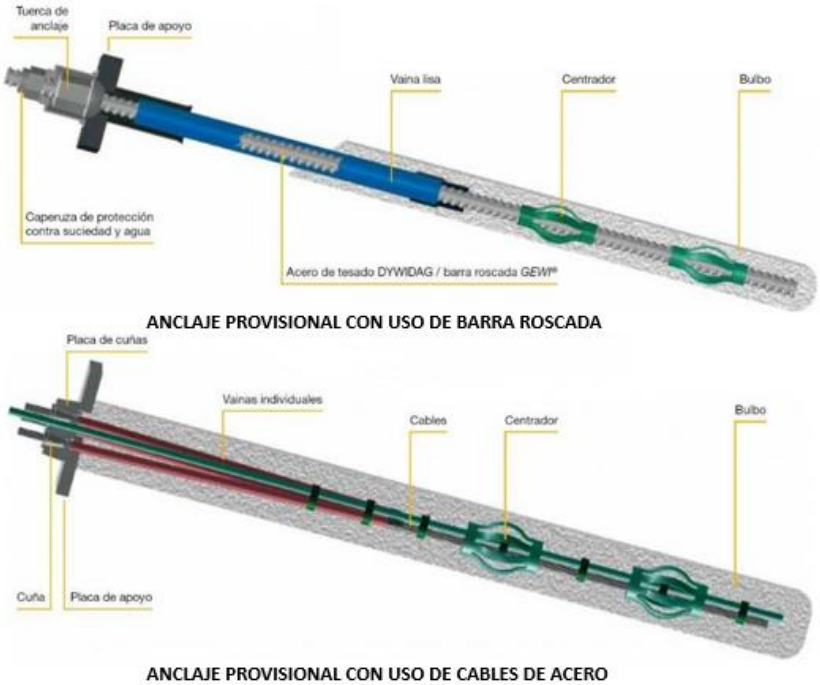
Dentro de la tipología de anclajes existen diversas clasificaciones según cada autor, sin embargo, se mencionarán las seis principales clasificaciones en que han sido divididos según diferentes características.

- ✓ Tipos de anclajes según su vida útil.
- ✓ Tipos de anclajes según su mecanismo de sostenimiento.
- ✓ Tipos de anclajes según la dirección de perforación.
- ✓ Tipos de anclajes según la longitud libre de la barra.
- ✓ Tipos de anclajes según sus aplicaciones.
- ✓ Tipos de anclajes según su forma de trabajo.

2.2.1 Tipos de anclajes según su vida útil. Según su vida útil los anclajes se pueden clasificar en provisionales y permanentes, como sus nombres lo indican estos anclajes dependen del tiempo en que sea necesario su uso. Es de gran importancia saber diferenciar que anclaje es el necesario según sea su funcionamiento, tanto en obra como a la hora del diseño, ya que debido a esto los coeficientes de seguridad cambian y con ello el diámetro y longitud de los anclajes, además de los sistemas de protección.

2.2.1.1 **Anclajes provisionales.** Son aquellos que tienen como función estabilizar el terreno de forma temporal, mientras es instalado otro tipo de estructura que sea la que finalmente va a darle contención y estabilidad al suelo[5]. Se considera un anclaje provisional cuando el tiempo de uso de este, sea menor a dos años y por tal motivo su protección contra la corrosión no debe ser parte esencial durante su construcción. Dentro de los anclajes provisionales existen algunos sistemas que permiten la recuperación parcial o total del ancla, lo que reduce considerablemente costos de instalación. En la figura 21 se observan dos anclajes provisionales, en la parte superior un anclaje construido por medio de una barra roscada y en la parte inferior construidos con la ayuda de cables de acero.

Figura 21. Anclajes provisionales.

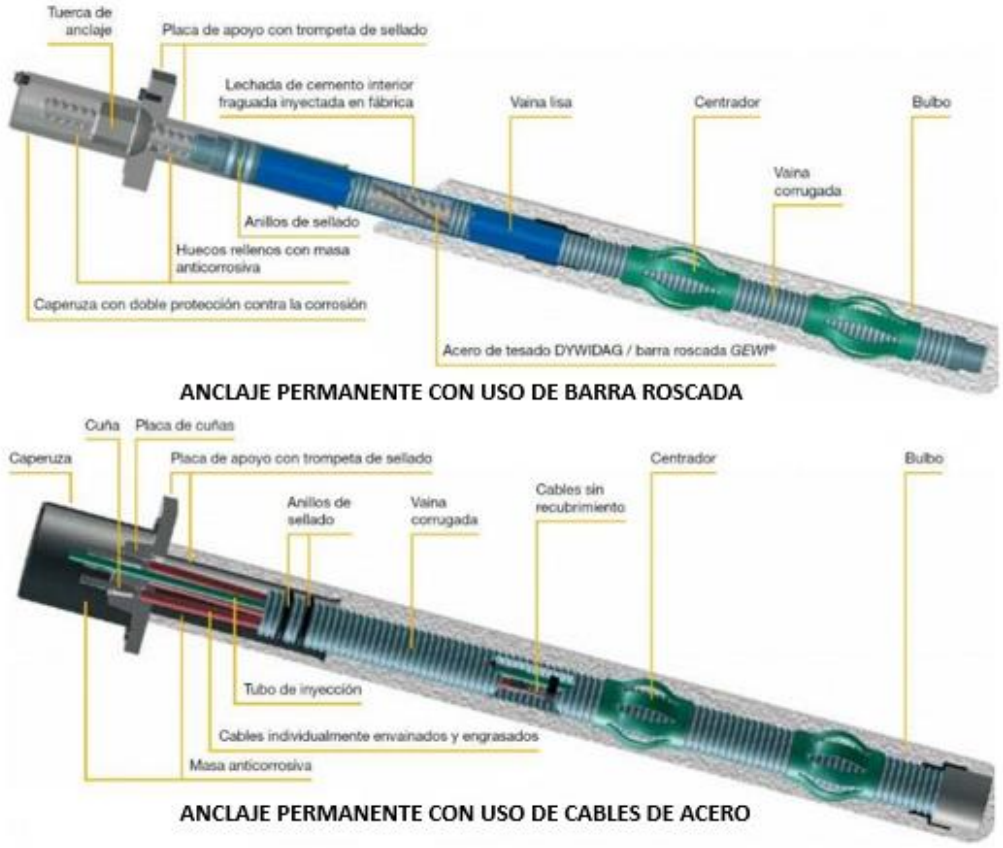


[5] MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Anclajes al terreno. p. 17.

FUENTE: Cómo calcular anclajes al terreno tipo Dywidag o Gewi. Estructurando.net. [En línea]. (Recuperado en 22 de marzo 2017) Disponible en http://estructurando.net/2015/05/25/como-calcular-anclajes-al-terreno-tipo-dywidag-o-gewi/

2.2.1.2 Anclajes permanentes. Son aquellos instalados de forma definitiva para la estabilidad del terreno, por tal motivo los factores de seguridad de este tipo de elementos son mayores, así como su protección ante la corrosión, ya que en caso de sufrir afectaciones no es posible realizarles mantenimiento ante tal amenaza. Los anclajes permanentes pueden tener un tiempo de duración de hasta aproximadamente 100 años[6]. En la figura 22 se observan dos anclajes permanentes, en la parte superior construido por medio de una barra roscada y en la parte inferior con la ayuda de cables de acero.

Figura 22. Anclajes permanentes.



FUENTE: Cómo calcular anclajes al terreno tipo Dywidag o Gewi. Estructurando.net. [En línea]. (Recuperado en 22 marzo 2017). Disponible en

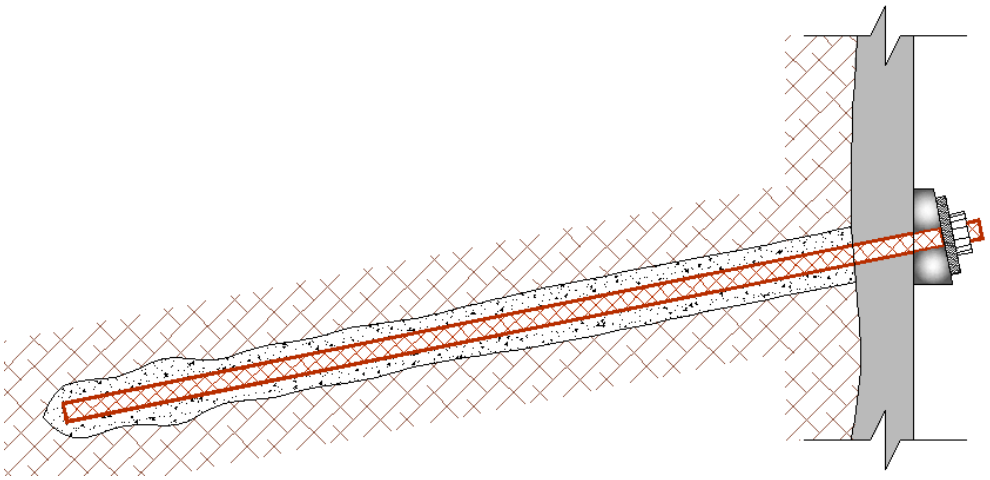
[6] MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A**.** Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 24.

http://estructurando.net/2015/05/25/como-calcular-anclajes-al-terreno-tipo-dywidag-o-gewi/

2.2.2 **Tipo de anclajes según su mecanismo de sostenimiento.** Según su mecanismo de sostenimiento los anclajes se clasifican en inyectados a gravedad, a presión y post-inyectado.

2.2.2.1 Anclajes inyectados a gravedad. Son aquellos anclajes llenados con lechada a gravedad. No presentan bulbo en la parte final de ancla para la conformación del elemento, por lo tanto, su resistencia depende de la fricción que se genere entre la perforación (la cual debe ser lo más rugosa posible) y la lechada. Este tipo de anclaje es usado normalmente en roca y en depósitos de suelos cohesivos compactos y su perforación es realizada por perforadoras rotativas o maquinas tuneladoras[7]. En la figura 23 se observa la geometría de un anclaje inyectado a gravedad.

Figura 23. Geometría de un anclaje inyectado a gravedad.

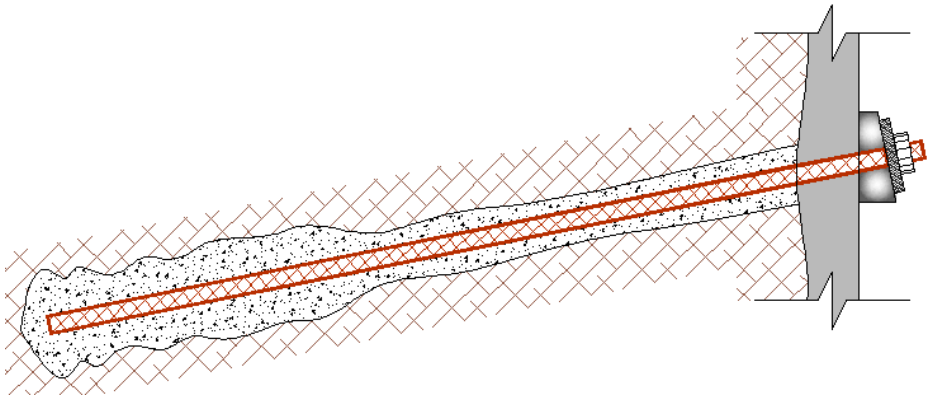


FUENTE: FLORES RUGELES, L; HERNANDEZ JOYA, C**.** Estudio sobre el diseño y construcción de anclajes como elementos de estabilización de taludes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. p. 25.

[7] FLORES RUGELES, L; HERNANDEZ JOYA, C**.** Estudio sobre el diseño y construcción de anclajes como elementos de estabilización de taludes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. p. 25.

2.2.2.2 Anclajes inyectados a presión. Son aquellos usados generalmente en suelos granulares gruesos, en rocas frágiles o fisuradas; y en suelos de granos finos sin cohesión. Este tipo de inyección es realizada con máquinas de bombeo las cuales permiten realizar un llenado más eficiente de la perforación que las realizadas a gravedad y por ende generan una mayor fricción entre el suelo y el anclaje. Su perforación es realizada con máquinas rotatorias y un encamisado que permite que las paredes externas de la perforación no se derrumben[8]. En la figura 24 se observa la geometría de un anclaje inyectado a presión.

Figura 24. Geometría de un anclaje inyectado a presión.

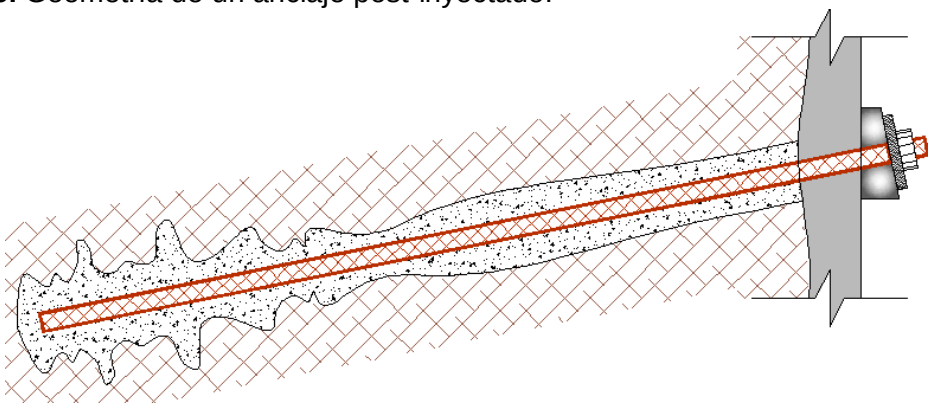


FUENTE: FLORES RUGELES, L; HERNANDEZ JOYA, C**.** Estudio sobre el diseño y construcción de anclajes como elementos de estabilización de taludes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. p. 25.

2.2.2.3 Anclajes post-inyectados. Son aquellos anclajes en que es necesaria varias fases de inyección y pueden estar distanciadas entre uno y dos días de ejecución, este proceso aplicado en estos anclajes es realizado por medio de lechada con el fin de generar un bulbo que penetre dentro de las fracturas de la roca y genere así una mejor adherencia entre el suelo y el ancla. Este proceso es realizado con la ayuda de un tubo de inyección sellado que se instala en el anclaje[9]. En la figura 25 se observa la geometría de un anclaje post-inyectado.

[8] Ibíd., p. 24.
[9] Ibíd., p. 25.

Figura 25. Geometría de un anclaje post-inyectado.

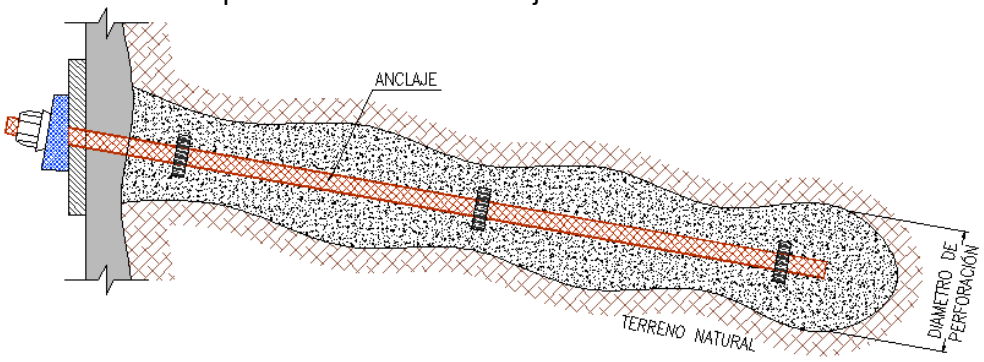


FUENTE: FLORES RUGELES, L; HERNANDEZ JOYA, C**.** Estudio sobre el diseño y construcción de anclajes como elementos de estabilización de taludes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. p. 25.

2.2.3 **Tipo de anclaje según la dirección de perforación.** Según esta clasificación pueden ser divididos en descendentes o ascendentes; y su construcción depende principalmente del uso que se le quiera dar al anclaje.

2.2.3.1 Anclajes descendentes. Estos anclajes son aquellos en los que la zona de bulbo se encuentra por debajo de la zona de tensionamiento y son usados principalmente en la contención de taludes convencionales. El proceso de inyección en este tipo de anclaje es realizado de forma tradicional ya que el proceso de llenado de la perforación por medio de la lechada tiene a favor la gravedad[10]. En la figura 26 se observa la dirección de perforación de los anclajes descendentes.

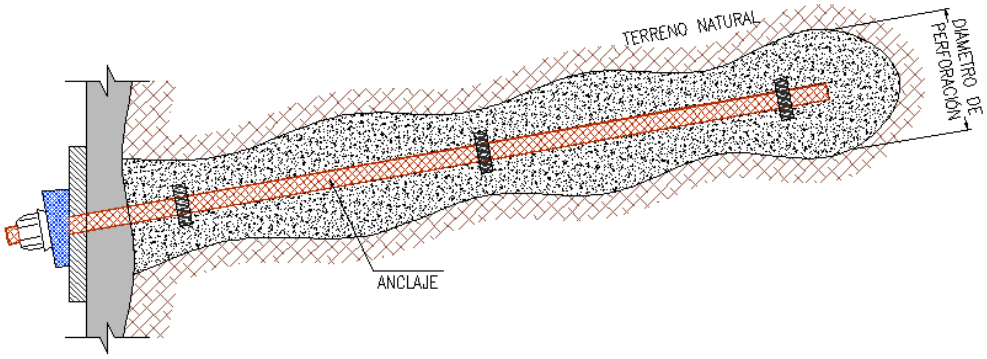
Figura 26. Dirección de perforación de los anclajes descendentes.



[10] Ibíd., p. 25.

2.2.3.2 **Anclajes ascendentes.** Son aquellos donde la zona de bulbo se encuentra en un nivel superior que la zona de tensionamiento y son usados principalmente en la construcción de túneles o deprimidos. El proceso de inyección en este tipo de anclaje requiere un procedimiento especial de llenado, usando accesorios que no permitan la salida de la lechada ya que la gravedad trata de expulsar la inyección debido a la dirección de la perforación. En la figura 27 se observa la dirección de perforación de los anclajes ascendentes.

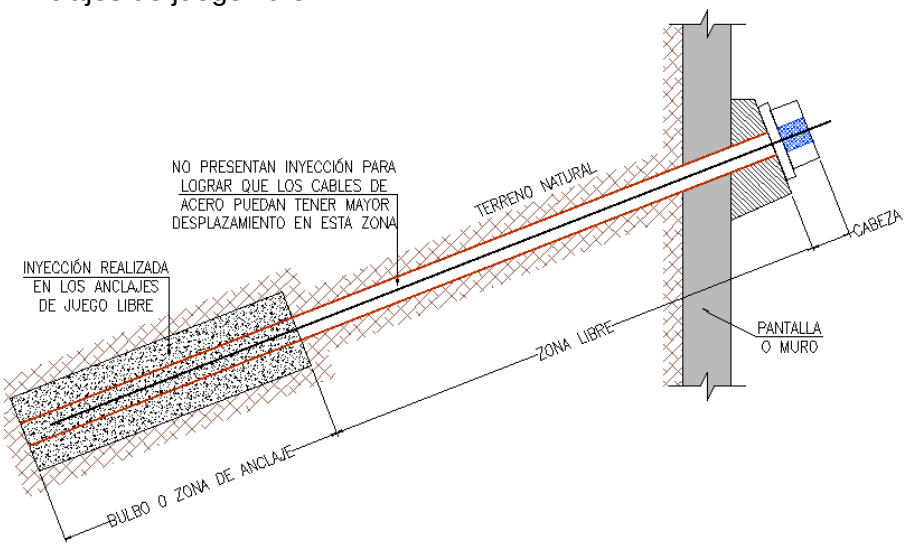
Figura 27. Dirección de perforación de los anclajes ascendentes.



2.2.4 **Tipo de anclaje según la longitud libre de la barra.** Esta clasificación depende básicamente de si es o no realizado el proceso de inyección a la zona libre del anclaje y se pueden clasificar en anclajes de juego libre o anclajes bloqueados.

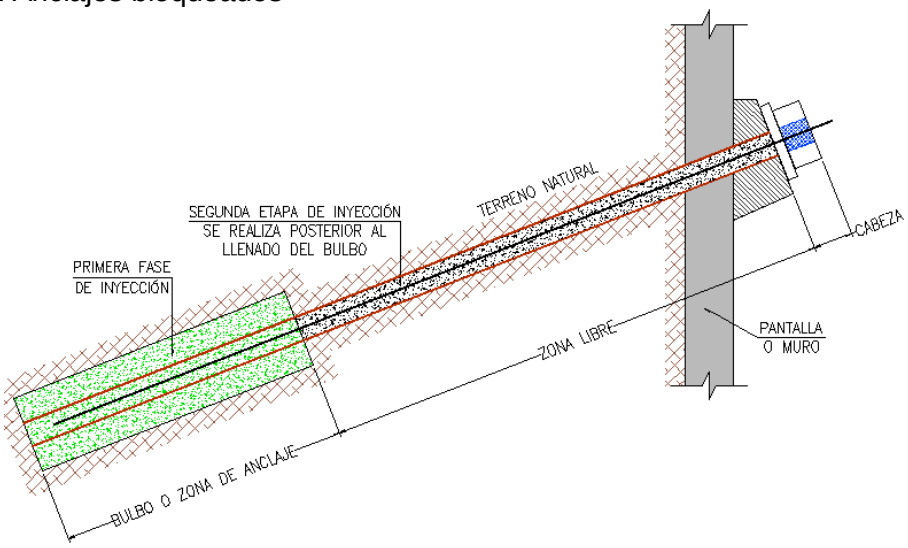
2.2.4.1 Anclajes de juego libre. Estos anclajes son aquellos donde los cables de acero se pueden desplazar en la zona de longitud libre para el tensionamiento de la barra. Son comúnmente usados como anclajes provisionales, debido a que no se realizan procesos de reinyección posterior al tensionamiento en la zona libre; y por ende se tiene una mayor exposición a procesos de corrosión en esta parte del ancla. En la figura 28 se observa un anclaje de juego libre donde se puede apreciar que la zona libre no es reinyectada con lechada.

Figura 28. Anclajes de juego libre



2.2.4.2 Anclajes bloqueados. Presentan las mismas características de los anclajes de juegos libres con la diferencia de que posteriormente al proceso de tensionamiento es re-inyectada la zona con el fin de generar una mayor fricción al terreno y proteger al ancla de los procesos de corrosión. En la figura 29 se observan las dos fases de inyección usadas en los anclajes bloqueados.

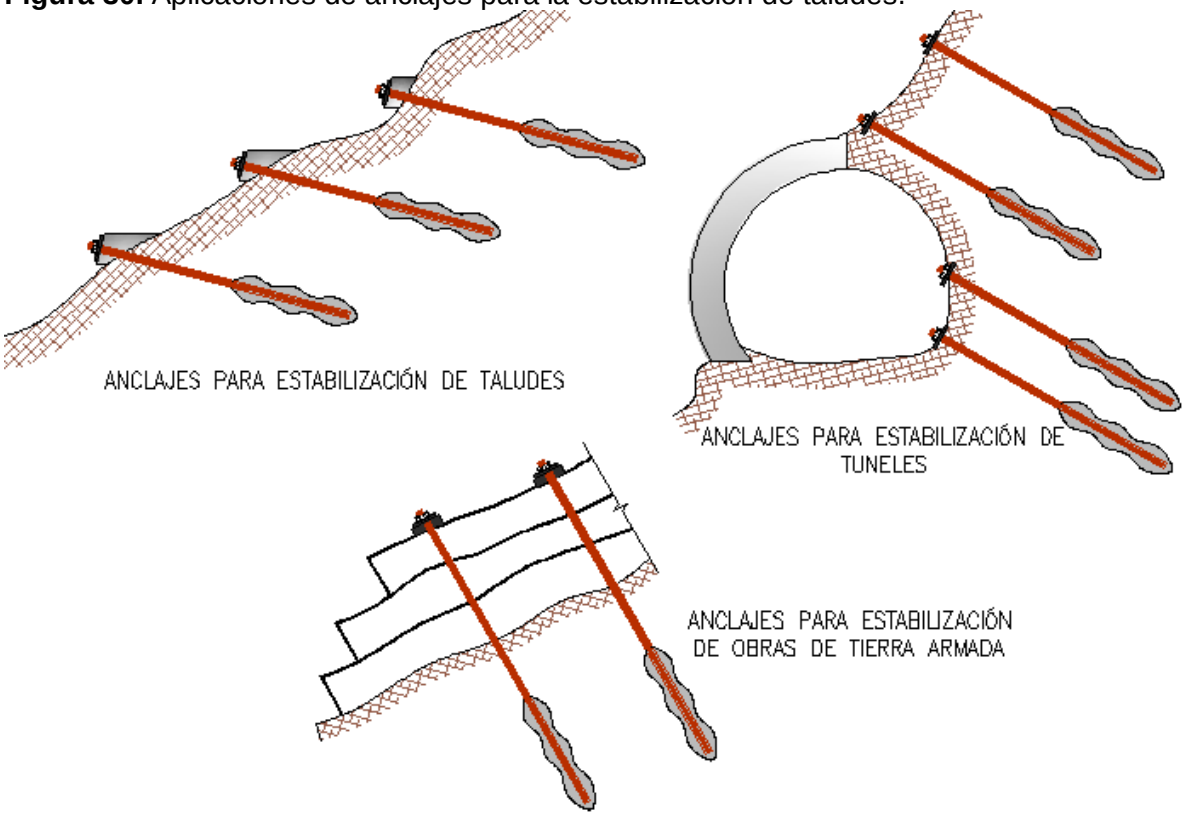
Figura 29. Anclajes bloqueados



2.2.5 Anclajes según sus aplicaciones. Existen varias aplicaciones usadas con los anclajes, sin embargo, pueden agruparse principalmente en cuatro categorías como el uso para la estabilización de taludes, arriostramiento de estructuras de contención, absorción de esfuerzos en cimentaciones y refuerzo de estructuras.

2.2.5.1 Estabilización de taludes. Esta aplicación es comúnmente usada en la construcción de vías ya sea para la estabilización de suelos, en la construcción de túneles, entre otros. En el proceso de diseño de los anclajes usados para la estabilización de taludes se debe tener especial cuidado con que parte del anclaje se encuentre por detrás del corte de falla, con el fin de evitar una inestabilidad del talud[11]. En la figura 30 se observan tres diferentes formas de uso de los anclajes para la estabilización de taludes.

Figura 30. Aplicaciones de anclajes para la estabilización de taludes.

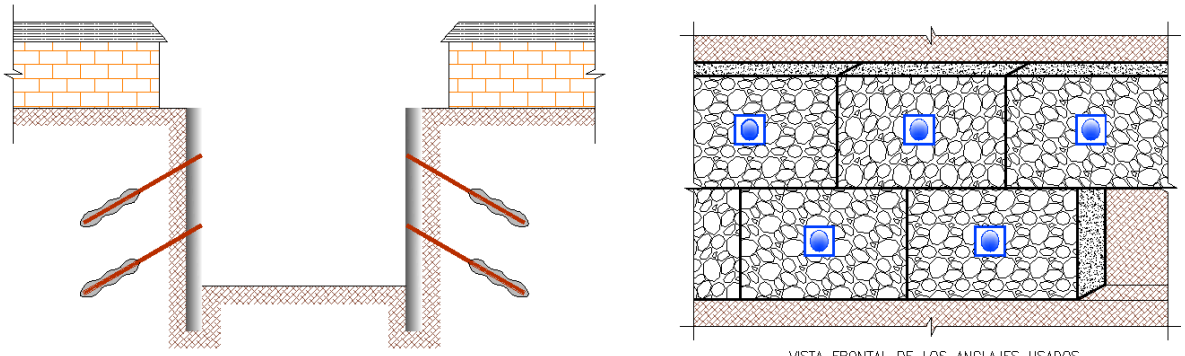


FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. P. 19.

[11] MURILLO, ORTUÑO; URIEL & ASOCIADOS, S.A.Op. cit., p. 19.

2.2.5.2 **Arriostramiento de estructuras de contención.** Esta aplicación dada a los anclajes es comúnmente usada en la construcción de estructuras principalmente de edificaciones para evitar la inestabilidad de los suelos en estructuras vecinas. Es importante resaltar que posterior a la construcción de la estructura, los anclajes activos deben destensionarse con el fin de evitar accidentes a futuro cuando en el lote vecino realicen alguna excavación, ya que al ser tensionados estos quedan activos y pueden generar inestabilidad en la pantalla del muro por no realizarse el destensionamiento de manera controlada. En el caso de usar anclajes pasivos no se debe realizar este proceso ya que a estos no se les aplican tensionamiento[12]. En la figura 31 se observa la aplicación dada a los anclajes para el arriostramiento de estructuras de contención en las excavaciones realizadas para la construcción de cimentaciones.

Figura 31. Aplicación de los anclajes para el arriostramiento de estructuras de contención.

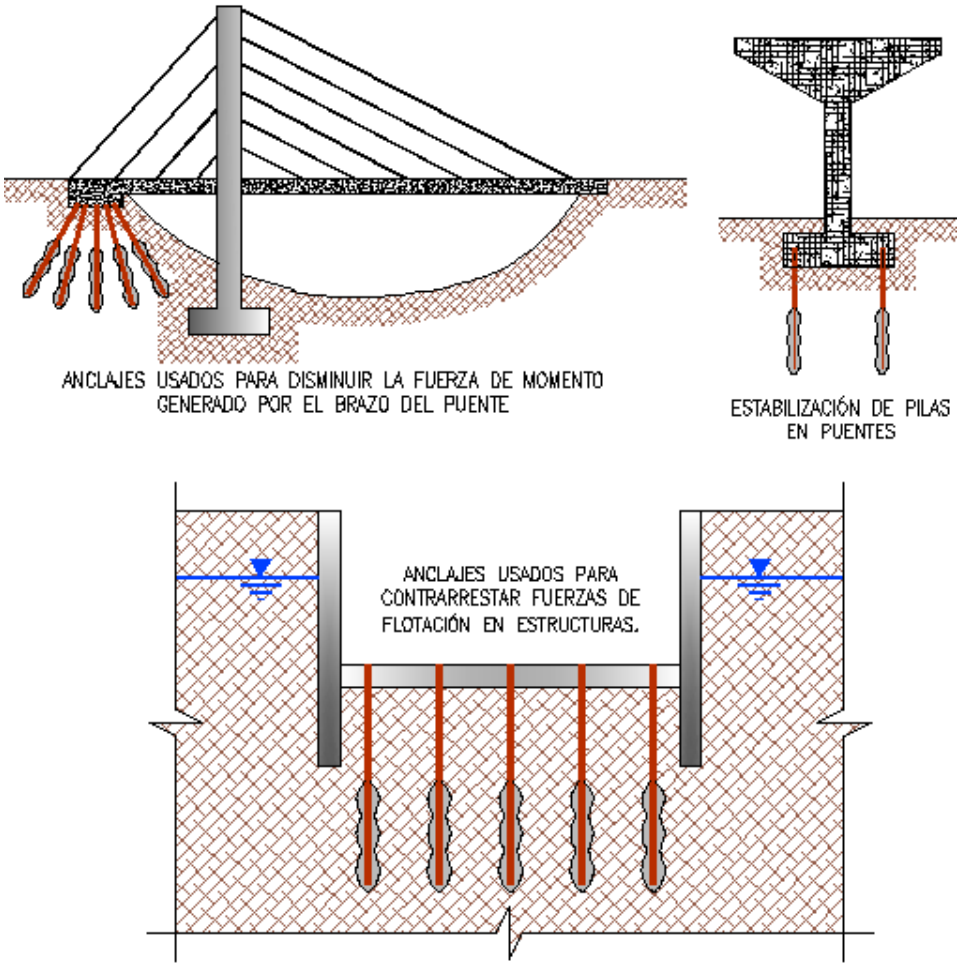


FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A**.** Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. P. 20.

[12] Ibíd., p.20.

2.2.5.3 **Absorción de esfuerzos en cimentaciones.** Esta aplicación es usada cuando se requiere generar estabilizaciones de estructuras ya que su geometría, ubicación o arquitectura no se la pueden garantizar. Los anclajes son elementos capaces de contrarrestar fuerzas externas que inducen a volcamientos, flotación o disminución de momentos con la ayuda de fuerzas opuestas generada por la tensión de los anclajes[13]. En la figura 32 se observa el uso dado a los anclajes en la absorción de esfuerzos en cimentaciones principalmente cuando se requiere generar algún tipo de estabilidad.

Figura 32. Aplicación de los anclajes en la absorción de esfuerzos en las cimentaciones.

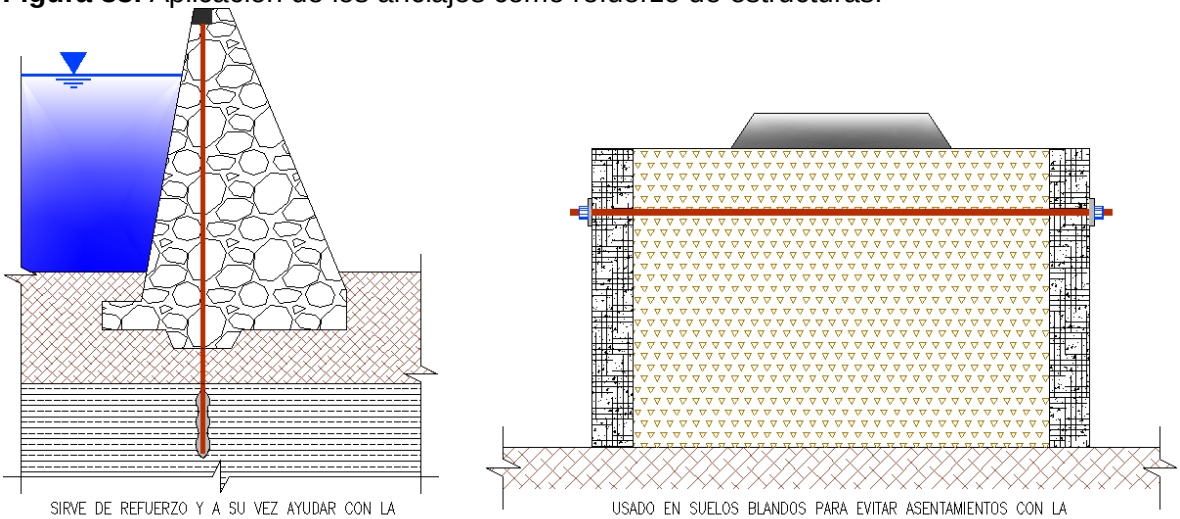


FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 20.

[13] Ibíd. p. 20.

2.2.5.4 **Refuerzo de estructuras.** Este tipo de anclaje es usado para el refuerzo de estructuras y es también nombrado como post-tensado o pretensado. Lo cual como su nombre lo indica consiste realizar tensionamiento de cables o anclajes especiales de acero ya sea antes o después de fraguado el concreto. El principal objetivo en este tipo de estructuras es lograr mayores luces y a su vez resistir cargas de mayor magnitud que las estructuras de concreto construidas de forma convencional[14]. En la figura 33 se observan algunos usos que se le dan a los anclajes en el reforzamiento de estructuras.

Figura 33. Aplicación de los anclajes como refuerzo de estructuras.



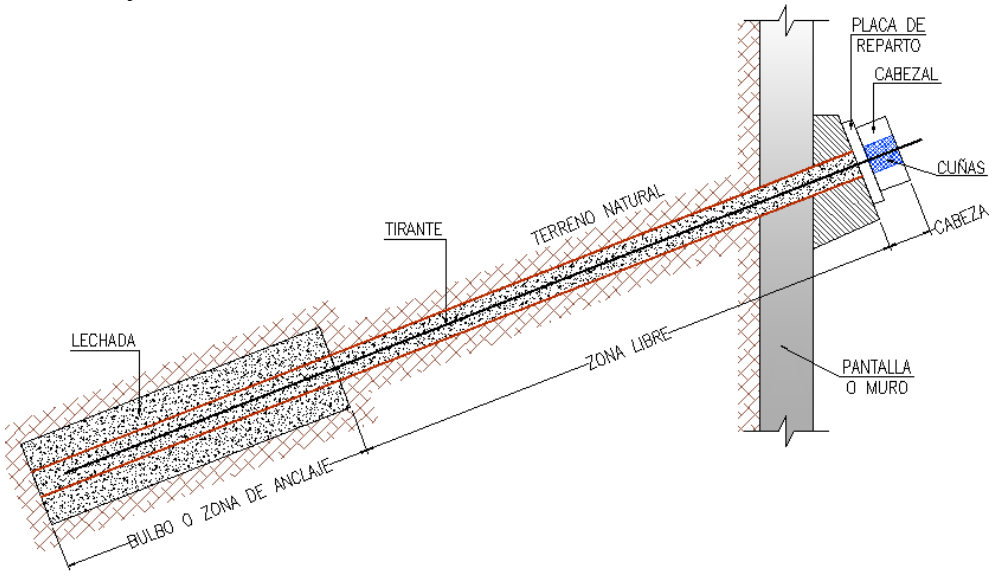
FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A**.** Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 19.

[14] Ibíd. p. 19.

2.2.6 **Anclajes según su forma de trabajo.** Según esta clasificación se pueden dividir en anclajes activos y anclajes pasivos. A continuación, se dará una breve descripción de estos tipos de anclajes, ya que en siguiente capítulo se abordarán de una forma más detallada estas dos tipologías.

2.2.6.1 Anclajes activos. Estos anclajes se caracterizan por estar conformados por tres partes principalmente, una zona de bulbo que se ubica en la parte final del anclaje, una zona libre y la zona del cabezal que se encuentra a nivel superficial donde se realiza el proceso de tensionamiento con la ayuda de sistemas hidráulicos. Estos anclajes presentan pantallas de concreto las cuales sirven de soporte al suelo generando así la estabilidad[15]. En la figura 34 se observan las principales partes de los anclajes activos.

Figura 34. Anclajes activos.

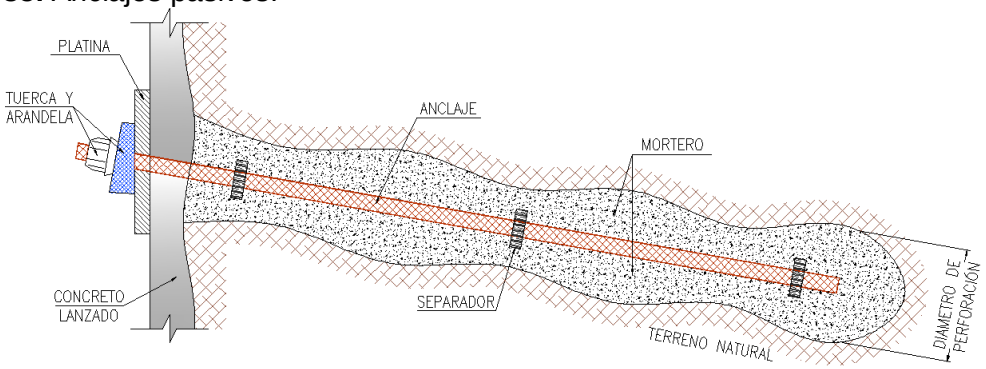


FUENTE: DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS. Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera. Madrid, Enero 2001, p.10.

[15] DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS. Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera. Madrid, Enero 2001. p.10.

2.2.6.2 **Anclajes pasivos.** Este tipo de anclaje no presenta zona de bulbo como en los anclajes activos. Adicionalmente no se realiza el proceso de tensionamiento por ende empiezan a trabajar cuando se producen desplazamientos en el suelo[16]. Para la construcción de los anclajes pasivos se recomienda el uso de concreto lanzado en lugar de usar pantallas, debido al peso que esto le ocasiona al sistema. En la figura 35 se observan las principales partes de los anclajes pasivos.

Figura 35. Anclajes pasivos.



FUENTE: Cálculo de soil nail walls o muros anclados con hormigón proyectado. [En línea]. (Recuperado en 26 de marzo 2017). Disponible en http://estructurando.net/2013/11/26/calculo-de-soil-nail-walls-o-muros-anclados-con-hormigon-proyectado/

3 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En el presente capitulo se realizará una justificación y descripción del proyecto con el fin de conocer las razones que impulsaron la realización de este. Dentro de los ensayos realizados en obra se encuentran el REMI, MASW y una tomografía eléctrica suministrados por la empresa INGEOTECNIA y por el centro de investigación para la erosión y los desplazamientos (CIED).

3.1 JUSTIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Como es de conocimiento, cuando se realiza una obra nueva se debe llevar a cabo un proceso de excavación, ya sea de poca profundidad como es el retiro de material orgánico o de altas profundidades consecuencia de las propiedades del suelo y de los requerimientos del proyecto a ejecutar. Debido a este proceso de alteración del

[16] Cálculo de soil nail walls o muros anclados con hormigón proyectado. [En línea]. (Recuperado en 26 de marzo 2017). Disponible en http://estructurando.net/2013/11/26/calculo-de-soil-nail-walls-o-muros-anclados-con-hormigon-proyectado/

suelo se ha observado que al realizar excavaciones superiores a los dos metros aproximadamente se empiezan a presentar problemas de asentamientos evidenciadas en grietas y/o fisuras en estructuras aledañas a la construcción en el sector de Bucaramanga, departamento de Santander. Estas afectaciones van desde daños de elementos no estructurales tales como pisos, muros divisorios, entre otros; hasta comprometer elementos estructurales como columnas, vigas, etc; Llegando en ocasiones a generar problemas de estabilidad en estructuras cercanas.

Debido a la problemática descrita anteriormente, surge la necesidad de conocer las características y propiedades del suelo antes de iniciar el proceso de excavación, para así lograr identificar si las propiedades del suelo se están alterando durante este proceso. Para tal fin se realizaron ensayos geofísicos como son el REMI y el MASW.

Con estos ensayos se pretende conocer cómo se afecta el suelo mientras se realiza el proceso de perforación por medio del cambio de propiedades que pueden ser registrados en los ensayos REMI y MASW, adicionalmente identificar si hay cambios en las propiedades del suelo después del proceso de tensionamiento realizando una tomografía eléctrica.

Con los resultados obtenidos de estos ensayos se pretende conocer si las afectaciones encontradas en estructuras colindantes a las excavaciones es producto de las propiedades mecánicas del suelo o por el contrario se debe a un incumplimiento de requisitos de diseño pautados en la NSR-10.
Para lograr tal objetivo se han realizado los ensayos REMI, MASW y una tomografía eléctrica en la misma línea sísmica en el costado norte del proyecto a intervenir (Monterredondo II). Esta toma de datos fue realizada en tres fases, por un lado, la fase I se subdividió en dos etapas (antes de iniciar con la construcción de los anclajes y durante la perforación de uno de estos), la fase II que se realizó después del proceso de tensionamiento de la primer fila de anclajes de este costado y la fase III se realizó cuando ya se contaba con toda la pantalla tensionada en la totalidad.

3.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO

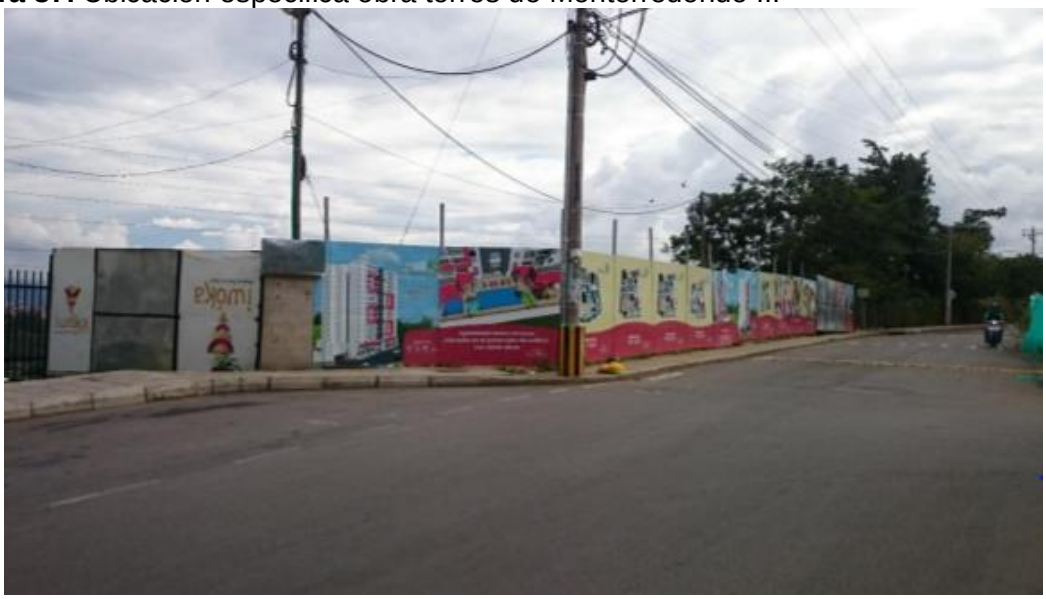
El proyecto donde fueron realizados los ensayos MASW, REMI y una tomografía eléctrica para la realización del presente documento fue en la calle 65 con carrera 15-par, en el barrio Monterredondo (Bucaramanga), departamento de Santander, cuyo nombre del proyecto es Torres de Monterredondo II.

En la figura 36 y 37 se observa la ubicación general y especifica del proyecto Torres de Monterredondo II, respectivamente.

Figura 36. Ubicación general obra torres de Monterredondo II.

FUENTE: Diseño de estructuras de contención realizado por la empresa INGEOTECNIA.

Figura 37. Ubicación especifica obra torres de Monterredondo II.



FUENTE: Diseño de estructuras de contención realizado por la empresa INGEOTECNIA.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El lote donde se realizaron los ensayos REMI, MASW y una tomografía eléctrica del presente estudio se caracteriza por tener en sus costados las siguientes delimitantes:

- ✓ Al sur: Zona verde, conjunto Monterredondo I.
- ✓ Al norte: Calle 65.
- ✓ Al oriente: Conjunto Monterredondo I.
- ✓ Al occidente: Ladera natural.

En la figura 38 se observa la ubicación de los costados mencionados anteriormente.

Figura 38. Ubicación de los costados en el lote Torres de Monterredondo II.

Los ensayos REMI, MASW y la tomografía eléctrica se realizaron en el costado Norte (calle 65) ya que en este lugar se realizaron anclajes activos con el fin de poder estabilizar el talud mientras se alcanzaba el nivel de cimentación necesario para la ejecución del proyecto.

Es importante recalcar que este proyecto ya presentaba un estudio de suelos realizado por la empresa INGEOTECNIA, además uno de los sondeos fue realizado sobre el costado norte (sector donde se realizaron los ensayos REMI, MASW y la tomografía eléctrica), por tal motivo se considera importante citar las propiedades dadas en el estudio de suelos. En la figura 39 se observan algunas de las propiedades tales como peso unitario, ángulo de fricción y cohesión efectivos.

Figura 39. Propiedades del suelo del proyecto Monterredondo II.

Tipo de suelo	Peso unitario (KN/m^3)	Angulo de fricción (°)	Cohesión (KN/m^2)
Suelo aluvial compuesto por arcillas arenosas con gravas (Tipo 1).	18.06	29	12
Suelos aluviales compuestos por cantos embebidos en una matriz arcillo arenosa (Tipo 2).	18.99	33	15

FUENTE: Diseño de estructuras de contención realizado por la empresa INGEOTECNIA.

Adicionalmente se encontró en el estudio de suelos que no hay presencia de nivel freático, sin embargo, cerca al proyecto se encuentra la quebrada la Flora ubicada al suroriente del lote. [Diseño de estructuras de contención realizado por la empresa INGEOTECNIA.].

3.4 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LOS ENSAYOS

Como se mencionó anteriormente en el proyecto Monterredondo II se realizaron tres fases. A continuación, se dará una descripción sobre el proceso realizado para la medición de datos.

3.4.1 **Fase I:** La fase I del presente proyecto se realizó el día 03 de marzo de 2017 donde se realizaron dos ensayos, el ensayo REMI y el ensayo MASW, ambos realizados antes de iniciar con el proceso de perforación. Se debe aclarar que estos ensayos fueron realizados en la fase inicial del proyecto, antes de que iniciara el proceso de tensionamiento de la primera fila de anclajes del costado norte. La fuente del ensayo REMI fue por medio del ruido ambiental (tráfico de carros, ruido de retroexcavadora, trabajadores, entre otros).

A continuación, se dará una breve descripción sobre el proceso llevado a cabo para la toma de datos:

- ✓ **Ubicación de geófonos:** En la figura 40 se observa la instalación de la línea sísmica ubicada al costado norte de la obra Torres de Monterredondo II. Esta línea sísmica está conformada por 24 geófonos instalados a una distancia de aproximadamente un metro entre ellos.

Figura 40. Instalación de línea sísmica en el proyecto Monterredondo II.

- ✓ **Porra y platina para el ensayo MASW:** En la figura 41 se observa la porra y la platina utilizadas para el ensayo MASW.

Figura 41. Elementos como platina y porra utilizados en el ensayo MASW.

- ✓ **Uso de porra y platina en el ensayo MASW**: En la figura 42 se observa uno de los operarios realizando el golpe a la platina por medio de la porra cerca a uno de los geófonos donde es realizado el ensayo MASW.

Figura 42. Realización de ensayo MASW en la fase I del proyecto.

Para la realización de este ensayo, la platina se desplazó por cada uno de los geófonos donde se le realizaron cuatro golpes con el fin de obtener la mayor cantidad de datos, para el procesamiento de los mismos. El ensayo MASW fue realizado antes y durante el proceso de perforación de los anclajes con la ayuda de la porra y la platina.

3.4.2 **Fase II.** La fase II del presente proyecto se realizó el día 03 de marzo de 2017 donde se realizaron dos ensayos, el ensayo REMI y el ensayo MASW, ambos realizados mientras se perforaba un anclaje en el mismo talud. Se debe aclarar que estos ensayos fueron realizados en la fase inicial del proyecto, antes de que iniciara el proceso de tensionamiento de la primera fila de anclajes del costado norte. La fuente del ensayo REMI fue durante el proceso de perforación realizada con el ruido generado por la máquina perforadora (KQY).

A continuación, se dará una breve descripción sobre el proceso llevado a cabo para la toma de datos:

- ✓ **Perforación de anclajes:** En la figura 43 se observa el proceso de perforación de un anclaje activo del costado norte por medio de un equipo colgante denominado KQY, donde con la ayuda de los geófonos son obtenidos los resultados para el procesamiento.

Figura 43. Toma de datos por medio de ensayo REMI usando como fuente la perforación de un anclaje activo.

- ✓ **Recopilación de datos:** En la figura 44 se observa como son recopilados los datos a través de un equipo computacional. Adicionalmente se puede apreciar el sismógrafo, el cual es conectado a la línea sísmica que se extiende para los ensayos REMI o MASW.

Figura 44. Recopilación de datos a través de un equipo computacional y un sismógrafo.

3.4.3 **Fase III.** La fase III del presente proyecto se realizó el día 21 de marzo de 2017, se realizaron dos ensayos, el ensayo REMI (mientras se deja encendido un minicargador) y el ensayo MASW (donde nuevamente es usado la platina y la porra). Estos ensayos fueron realizados cuando ya se tenía tensionada la primera fila de anclajes del proyecto Torres de Monterredondo II en el costado norte.

A continuación, se dará una breve descripción sobre el proceso llevado para la toma de datos, sin embargo, es importante aclarar que las etapas realizadas en esta fase son idénticas a la de la fase I y fase II. Sin embargo, se deja evidencia fotográfica de la toma de datos de la fase III.

- ✓ **Pantalla con la primera fila de anclajes tensionados**: En la figura 45 se observa la pantalla anclada después de un proceso de tensionamiento en el proyecto Torres de Monterredondo II al costado norte.
- ✓

Figura 45. Pantalla costado norte, tensionada la primera fila de anclajes.

- ✓ **Ubicación de geofonos:** En la figura 46 se observa el extendido de la línea sísmica donde son realizados los ensayos REMI y MASW. Al igual que la primera fase son ubicados 24 geofonos separados a una distancia de aproximadamente un metro entre ellos.

Figura 46. Línea sísmica tendida en la Fase III del proyecto.

- ✓ **Uso de porra y platina en el ensayo MASW:** En la figura 47 se observa la realización del ensayo MASW donde se puede observar como nuevamente es golpeada la platina por medio de la porra con el fin de inducir al suelo ondas para la toma de datos.

Figura 47. Realización del ensayo MASW en la fase III del proyecto.

- ✓ **Fuente usada para el ensayo REMI:** En la figura 48 se puede observar el minicargador que es usado como fuente debido al ruido que genera en la realización del ensayo REMI.

Figura 48. Minicargador utilizado como fuente para la obtención de datos mediante ensayo REMI.

- ✓ **Recopilación de datos:** En la figura 49 se observa el registro de datos obtenidos de los ensayos REMI y MASW a través del sismógrafo y un equipo computacional. Estos datos son obtenidos y posteriormente llevados a la oficina donde se procesan y se obtienen los resultados finales.

Figura 49. Recolección de datos a través del sismógrafo y un equipo computacional.

3.4.4 **Fase IV.** La fase IV del presente proyecto se realizó el día 15 de agosto del 2017, se realizaron tres ensayos, el ensayo REMI (con el sonido que se tiene en obra) y el ensayo MASW (donde nuevamente es usado la platina y la porra) y una tomografía eléctrica. Estos ensayos fueron realizados cuando ya se tenía todas las filas de anclajes tensionadas de la pantalla del proyecto Torres de Monterredondo II en el costado norte.

A continuación, se dará una breve descripción sobre el proceso llevado para la toma de datos, sin embargo, es importante aclarar que las etapas realizadas en esta fase son idénticas a la de la fase I, II y III a excepción del ensayo de la tomografía eléctrica realizado. Sin embargo, se deja evidencia fotográfica de la toma de datos de la fase IV.

- ✓ **Pantalla con la fila de anclajes tensionados en su totalidad**: En la figura 50 se observa la totalidad de la pantalla anclada después de un proceso de tensionamiento en el proyecto Torres de Monterredondo II al costado norte.

Figura 50. Pantalla costado norte, tensionada la totalidad de la misma.

- ✓ **Ubicación de geófonos:** En la figura 51 se observa el extendido de la línea sísmica donde son realizados los ensayos REMI y MASW. Al igual que la primera fase y la segunda son ubicados 24 geofonos separados a una distancia de aproximadamente un metro entre ellos.

Figura 51. Línea sísmica tendida en la Fase IV del proyecto.

- ✓ **Uso de porra y platina en el ensayo MASW:** En la figura 52 se observa la realización del ensayo MASW donde se puede observar como nuevamente es golpeada la platina por medio de la porra con el fin de inducir al suelo ondas para la toma de datos.
- ✓

Figura 52. Realización del ensayo MASW en la fase IV del proyecto.

- ✓ **Fuente usada para el ensayo REMI:** En la figura 53 se puede observar las actividades que se encuentran realizando en la obra, por lo tanto, el ruido generado por la misma es el que se utiliza como fuente para la realización del ensayo REMI.

Figura 53. Trabajo de la obra utilizado como fuente para la obtención de datos mediante ensayo REMI.

- ✓ **Recopilación de datos:** En la figura 54 se observa el registro de datos obtenidos de los ensayos REMI y MASW a través del sismógrafo y un equipo computacional. Estos datos son obtenidos y posteriormente llevados a la oficina donde se procesan y se obtienen los resultados finales.

Figura 54. Recolección de datos a través del sismógrafo y un equipo computacional durante la fase IV.

- ✓ **Tendido de los electrodos en la tomografía eléctrica:** En la figura 55 se observa el tendido de los electrodos para la realización de la tomografía eléctrica.

Figura 55. Tendido de los electrodos para el ensayo de la tomografía eléctrica.

- ✓ **Ubicación del cable para la toma de la tomografía eléctrica:** En la figura 56 se observa el tendido para la toma de la tomografía eléctrica en el costado norte de la obra Monterredondo II.

Figura 56. Tendido del cable para el ensayo de la tomografía eléctrica.

- ✓ **Unidad central y equipo computacional:** En la figura 57 se observa la unidad central encargada de ejecutar automáticamente la secuencia. Adicionalmente, el equipo computacional que procesado con un software arroja los resultados del ensayo realizado.

Figura 57. Unidad central y equipo computacional usado en el ensayo de tomografía eléctrica.

4 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REMI Y MASW

Como se ha mencionado anteriormente durante la ejecución del proyecto se realizaron tres tipos de ensayos, el ensayo REMI, el ensayo MASW y una tomografía eléctrica, el ensayo REMI y MASW se hicieron para las tres fases y la tomografía eléctrica se realizó en la última fase.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos obtenidos en sus respectivas fases. Cabe recordar que existen dos tipos de resultados, por un lado, aquellos que no presentan procesamiento y adicionalmente los que presentan procesamiento. Es normal que las velocidades de corte aumenten o disminuyan si se comparan los datos entre antes y después de un procesamiento en una misma fase ya que esto depende del aislamiento de datos descrita en las cuatro fases que se presentan a continuación:

- ✓ Datos sin procesamiento: son aquellos datos obtenidos en campo por medio de geófonos los cuales transfieren la información al software.

- ✓ Datos con procesamiento: son aquellos datos obtenidos en oficina que involucran principalmente tres pasos: análisis espectral de velocidad, selección de la dispersión fase-velocidad Rayleigh y modelado de la velocidad de la onda de cizalla[17].

4.1 FASE I

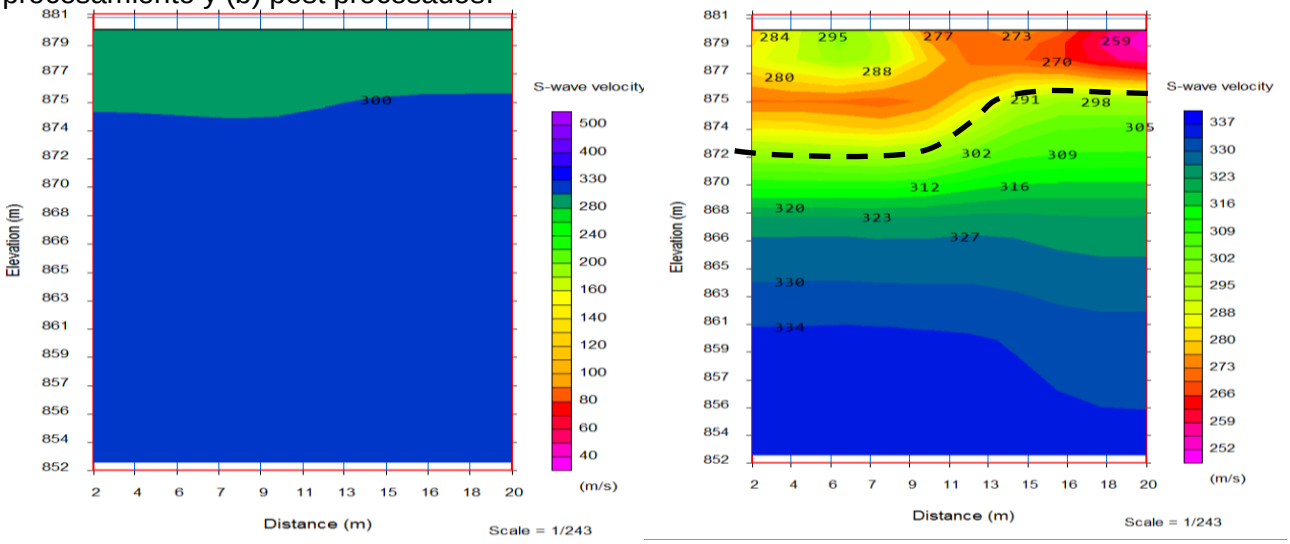
La fase I es realizada antes de iniciar el proceso de tensionamiento de la primera fila de anclajes con el fin de obtener las propiedades del suelo antes de ser intervenido. En esta fase se obtuvieron resultados antes de la realización de anclajes (estado inicial del terreno).

4.1.1 Resultados de los ensayos realizados antes de la perforación de anclajes.

En la figura 58 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observan los resultados del ensayo REMI antes de que se inicie con los procesos PIT (perforación, inyección y tensionamiento).

[17] LINARES MONTENEGRO, G**.** Introducción y aplicación del método de sísmica de microtemores en áreas urbanas. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Noviembre 2005. p. 9.

Figura 58. Resultados del ensayo REMI antes de iniciar perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.

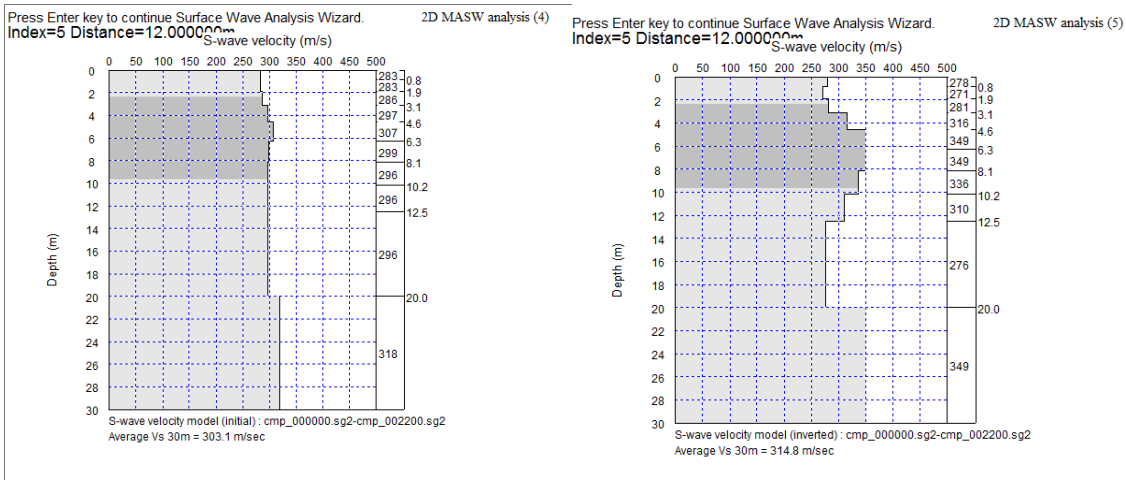


(a) (b)

FUENTE: INGEOTECNIA.

En la figura 59 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observa los resultados del ensayo MASW antes de que se inicie con los procesos PIT.

Figura 59. Resultados del ensayo MASW antes de iniciar perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.



(a) (b)

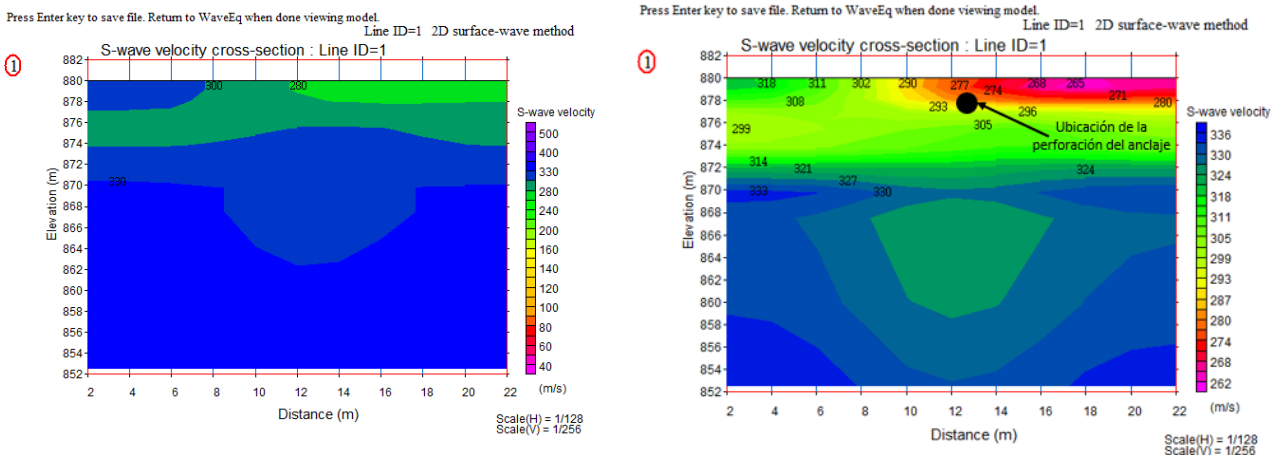
FUENTE: INGEOTECNIA.

4.2 FASE II

La fase II es realizada durante el proceso de perforación de los anclajes activos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

4.2.1 **Resultados de los ensayos realizados durante la perforación del anclaje.** En la figura 60 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observan los resultados del ensayo REMI durante el proceso de perforación.

Figura 60. Resultados del ensayo REMI durante el proceso de perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.

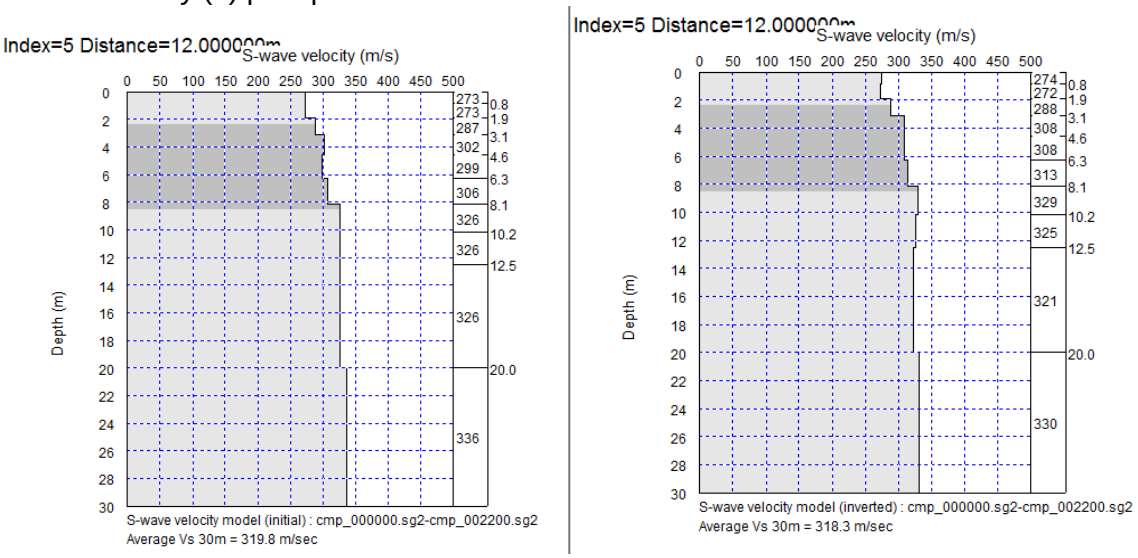


(a) (b)

FUENTE: INGEOTECNIA.

En la figura 61 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observa los resultados del ensayo MASW durante el proceso de perforación.

Figura 61. Resultados del ensayo MASW durante el proceso de perforación. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.



(a) (b)

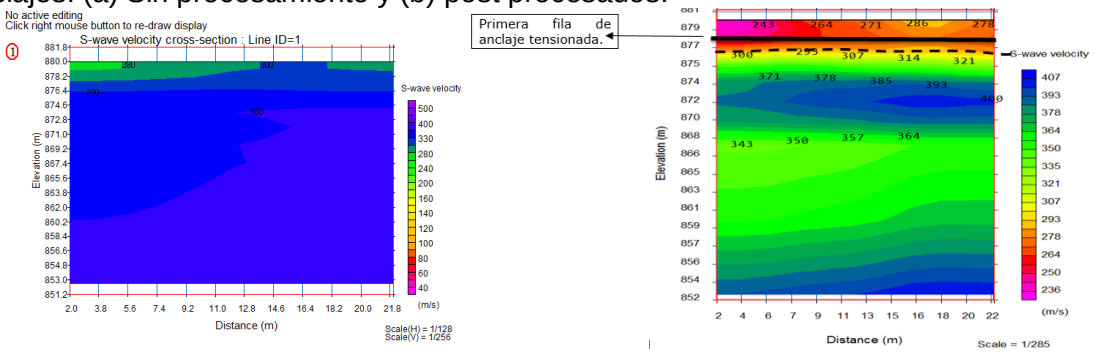
FUENTE: INGEOTECNIA.

4.3 FASE III

La fase III es realizada posteriormente de que se realizó el tensionamiento de la primera fila de anclajes con el fin de analizar cómo se encuentra el terreno después de realizar el tensionamiento de la primera fila de anclajes.

4.3.1 **Resultados ensayo después del tensionamiento de la primer fila de anclajes.** En la figura 62 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observa los resultados del ensayo REMI después tensionada la primera fila de anclajes.

Figura 62. Resultados del ensayo REMI después de tensionada la primera fila de anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.

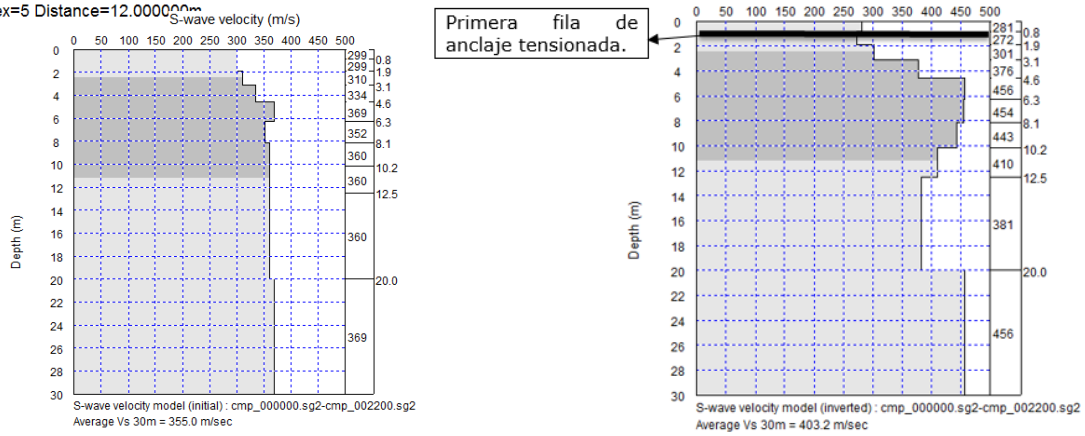


(a) (b)

FUENTE: INGEOTECNIA.

En la figura 63 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observa los resultados del ensayo MASW después de tensionada la primera fila de anclajes.

Figura 63. Resultados del ensayo MASW después de tensionada la primera fila de anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.



FUENTE: INGEOTECNIA.

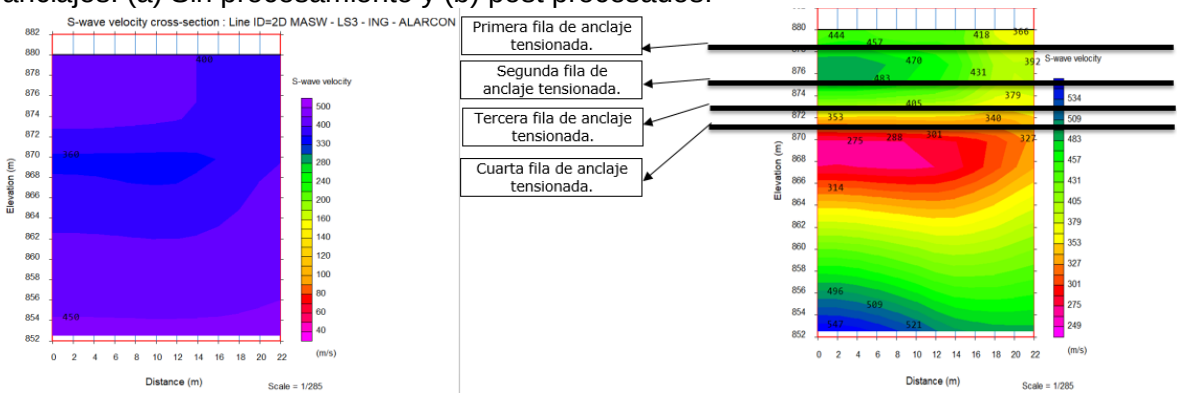
4.4 FASE IV

La fase IV es realizada posteriormente de que se realizó el tensionamiento de la totalidad de los anclajes (4 filas) con el fin de analizar cómo se encuentra el terreno en las condiciones finales después de construida la totalidad de la pantalla.

4.4.1 Resultados ensayo después del tensionamiento de la totalidad de los anclajes.

En la figura 64 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observa los resultados del ensayo REMI después tensionada la totalidad de los anclajes (4 filas).

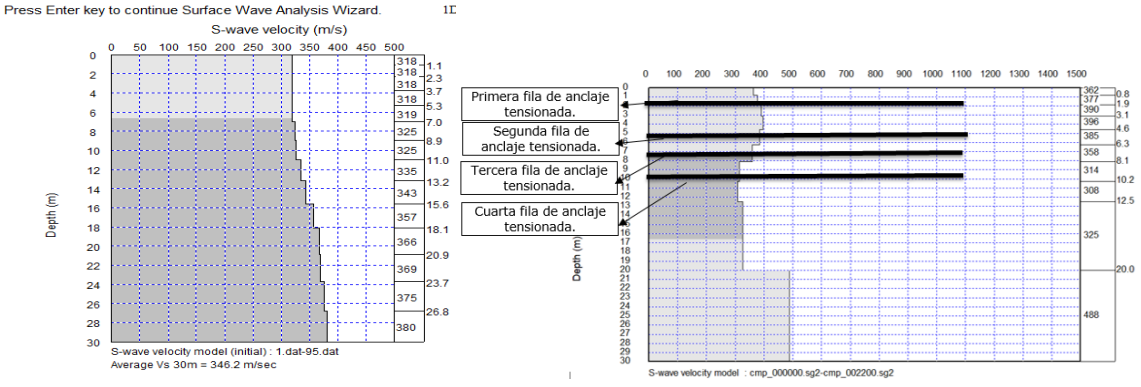
Figura 64. Resultados del ensayo REMI después de tensionada la totalidad de los anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.



FUENTE: INGEOTECNIA.

En la figura 65 ((a) sin procesamiento, (b) post procesados) se observa los resultados del ensayo MASW después de tensionada la totalidad de los anclajes.

Figura 65. Resultados del ensayo MASW después de tensionada la totalidad de los anclajes. (a) Sin procesamiento y (b) post procesados.

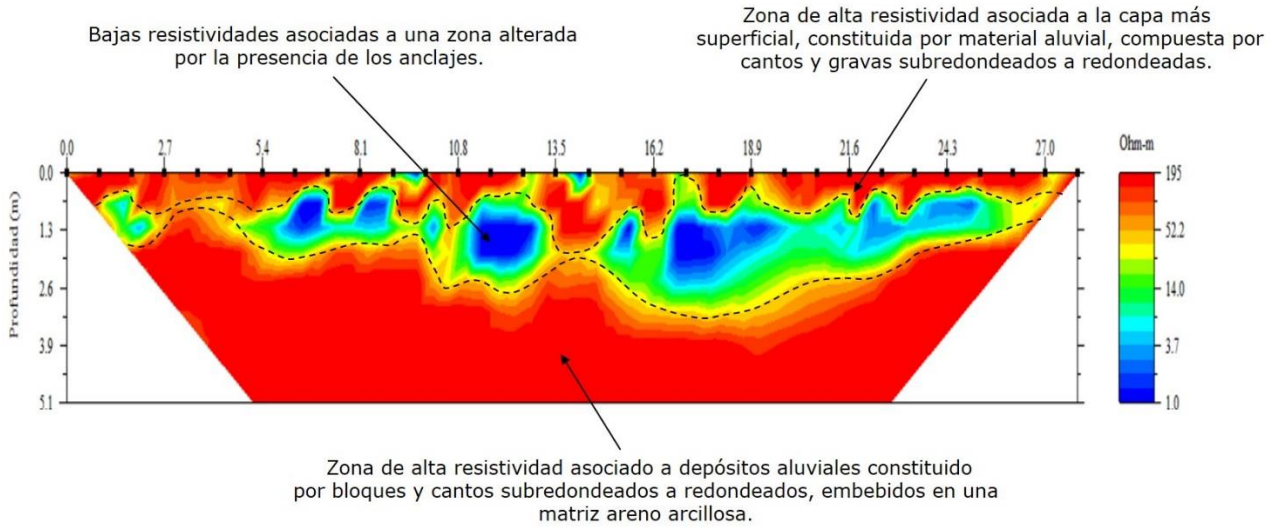


(a) (b)

FUENTE: INGEOTECNIA.

En la figura 66 se observa los resultados de la tomografía eléctrica tomada con la totalidad de la pantalla anclada.

Figura 66. Tomografía eléctrica tomada con la totalidad de la pantalla anclada.



FUENTE: INGEOTECNIA.

5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Después de analizar los resultados obtenidos de los ensayos REMI y MASW como primera medida se puede observar que estos resultados son similares siempre y cuando sean comparados entre una misma etapa o fase. En la figura 67 se observa una comparación entre los resultados obtenidos entre los ensayos REMI y MASW.

Figura 67. Comparación entre resultados entre los ensayos REMI y MASW.

	FASE I		FASE II		FASE III		FASE IV	
ENSAYO	REMI	MASW	REMI	MASW	REMI	MASW	REMI	MASW
METROS	ANTES DE LA PERFORACION	ANTES DE LA PERFORACION	DURANTE LA PERFORACION	DURANTE LA PERFORACION	TENSIONADA UNA FILA DE ANCLAJES	TENSIONADA UNA FILA DE ANCLAJES	TENSIONADA LA TOTALIDAD DE LOS ANCLAJES	TENSIONADA LA TOTALIDAD DE LOS ANCLAJES
1	280 m/s	300 m/s	280 m/s	270 m/s	300 m/s	280 m/s	420 m/s	380 m/s
2								
4			290 m/s	310 m/s				
6					380 m/s	340 m/s		
8	310 m/s	330 m/s			350 m/s		360 m/s	370 m/s
10								
12			320 m/s	320 m/s				
15	330 m/s	275 m/s			350 m/s	360 m/s		
20								
25		350 m/s		330 m/s		450 m/s	410 m/s	490 m/s
30								

Debido a lo anterior y para facilitar la interpretación de los resultados se trabajará con las velocidades obtenidas en los ensayos REMI. La decisión de tomar este ensayo como referencia para la interpretación de resultados está relacionado a que los datos entre los ensayos REMI y MASW no difieren en más de un 12%, por lo tanto, es indiferente el tipo de ensayo que se utilice para la interpretación de resultados.

En la figura 68 se observa la clasificación de los perfiles del suelo según la NSR-10, donde pueden ser clasificados en tipo A, B, C, D, E o F por medio del intervalo de velocidades. Por medio de esta tabla se compararán los ensayos REMI y MASW para poder clasificar los diferentes tipos de suelos obtenidos en la línea sísmica trabajada con la ayuda de los 24 geófonos.

Figura 68. Clasificación de los perfiles del suelo según la NSR-10.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s> $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈1 kgf/cm²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	50 > $\bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈1 kgf/cm²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈0.5 kgf/cm²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > $\bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total **H** mayor de 3 m de arcillas blandas	**IP** > 20 **w** ≥ 40% 50 kPa (≈0.50 kgf/cm²) > $\bar{s}_u$
F	Los perfiles de suelo tipo **F** requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F_1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F_2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (**H** > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F_3 — Arcillas de muy alta plasticidad (**H** > 7.5 m con Índice de Plasticidad **IP** > 75) F_4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (**H** > 36 m)	

FUENTE: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR 10. p-A-22.

5.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS ANTES DE LA PERFORACIÓN

Se puede observar que en los primeros seis metros la velocidad es aproximadamente 280 m/s donde según la norma pertenece al tipo de suelo D.

Entre los 6 y los 12 metros de profundidad se evidencia un cambio en la velocidad, variando a 310m/s aproximadamente siendo un tipo de suelo D pero con propiedades tales que casi llegan a ser clasificado como tipo C (360 m/s).

Entre los 12 y 30 metros de profundidad podemos observar que las velocidades que oscilan entre los 330m/s perteneciendo aún suelo tipo D con propiedades mejores a la capa anterior.

5.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DURANTE LA PERFORACIÓN

Se observa que durante esta fase las propiedades del suelo varían debido al proceso de perforación. En los dos primeros metros el valor de velocidad de corte es de 280 m/s dando un suelo tipo D. Se observa que no existen cambios en las velocidades de corte en estos primeros metros.

Entre los 2 y 10 metros de profundidad se observa un tipo de suelo con velocidad de 290 m/s. A esta profundidad se puede apreciar que las velocidades de corte del suelo disminuyen en casi 20 m/s, debido a que las vibraciones causadas por la maquinaria de perforación generan fisuración y daño a las zonas aledañas.

Entre los 10 y 30 metros de profundidad se evidencia una velocidad de 320 m/s observando así que las propiedades del suelo en comparación con la fase de antes de intervenir el terreno disminuye en 10 m/s. Lo que quiere decir que nuevamente se ven afectadas las características del suelo producto de las perforaciones de la maquinaria de perforación.

Finalmente, se puede concluir que la fase de perforación de los anclajes afecta el suelo disminuyendo sus propiedades mecánicas, físicas, etc. Principalmente en la zona donde son realizadas las perforaciones.

5.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS CON UNA FILA DE ANCLAJES TENSIONADA

Se puede observar que después de tensionada la primera fila de anclajes la velocidad de corte es aproximadamente 300m/s en los primeros cuatro metros**.**

Entre los 4 y 6 metros la velocidad de corte es de 380m/s, pasando en algunos sectores de suelo tipo D a suelo tipo C. Al comparar estos resultados con la fase anterior se evidencia un aumento de por lo menos 20 m/s.

Entre los 6 y 30 metros se observa velocidades de corte de 350 m/s, que al compararlos con la fase anterior mejoran las características del suelo debido a que mejora la velocidad de corte entre 30 y 60 m/s.

Finalmente, se puede concluir que la fase de tensionamiento de la primera fila de anclajes mejora las propiedades del suelo aumentando sus velocidades de corte entre un 10 y 15% aproximadamente.

5.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS CON LA TOTALIDAD DE LOS ANCLAJES TENSIONADOS

Se puede observar que después de tensionada la totalidad de los anclajes la velocidad de corte es aproximadamente 420 m/s en los primeros 6 metros, obteniendo así una mejora significativa en las propiedades del suelo mecánicas, físicas, etc, con un aumento de velocidad de corte del suelo de un 25% aproximadamente**.**

Entre los 6 y 20 metros se evidencia una velocidad de corte de 360 m/s mejorando en aproximadamente 10 m/s a la fase anterior.

Entre los 20 y 30 metros se observa una velocidad de corte de 410m/s obteniendo así un aumento en las características del suelo mecánicas, físicas, etc en aproximadamente un 20% comparadas con la fase anterior.

Finalmente, se puede concluir que la fase de tensionamiento de las cuatro filas de anclajes mejora las propiedades del suelo mecánicas, físicas, etc aumentando sus velocidades de corte en un 15% aproximadamente y logrando así un perfil de suelo tipo C durante los 30 metros de profundidad.

En la figura 69 se observa un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos realizados antes, durante la perforación, después de tensionada la primer fila de anclaje y tensionada totalmente toda la pantalla en lo referente a velocidades de corte.

Figura 69. Resultados de los ensayos antes, durante y después de la perforación.

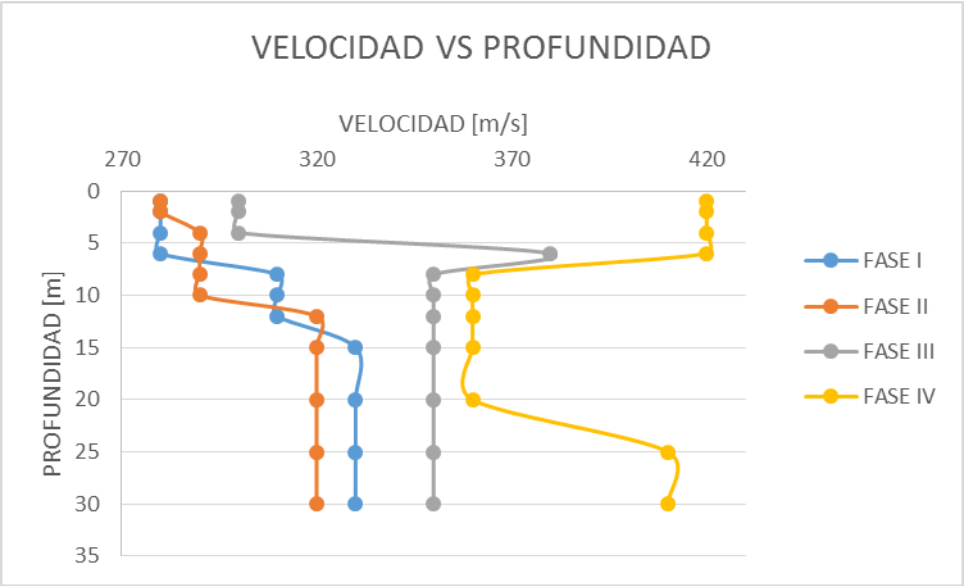
<table>
<tr><th>METROS</th><th>ANTES DE LA PERFORACION</th><th>DURANTE LA PERFORACION</th><th>TENSIONADA UNA FILA DE ANCLAJES</th><th>TENSIONADA LA TOTALIDAD DE LOS ANCLAJES</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="4">280 m/s</td><td rowspan="2">280 m/s</td><td rowspan="2">300 m/s</td><td rowspan="3">420 m/s</td></tr>
<tr><td>2</td></tr>
<tr><td>4</td><td rowspan="3">290 m/s</td></tr>
<tr><td>6</td><td>380 m/s</td></tr>
<tr><td>8</td><td rowspan="3">310 m/s</td><td rowspan="3">350 m/s</td><td rowspan="4">360 m/s</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td>12</td><td rowspan="5">320 m/s</td></tr>
<tr><td>15</td><td rowspan="4">330 m/s</td><td rowspan="4">350 m/s</td></tr>
<tr><td>20</td></tr>
<tr><td>25</td><td rowspan="2">410 m/s</td></tr>
<tr><td>30</td></tr>
</table>

	TIPO C
	TIPO D

Como se puede observar en la tabla anterior durante cada una de las fases el suelo fue mejorando a medida que se iban realizando los procesos PIT, a excepción de la fase II (durante la perforación) donde las velocidades de corte del suelo disminuyen producto de la afectación generada por la maquinaria de perforación de los anclajes. En los primeros seis metros se pasó de tener una velocidad de corte de 280 m/s a 420 m/s teniendo así una mejoría de cerca del 50%. Entre los 6 y 12 metros las velocidades de corte pasaron de 310 m/s a 360 m/s mejorando las propiedades del suelo mecánicas, físicas, etc en un 15%. En los últimos metros se pasó de tener una velocidad de corte de 330 m/s a 410 m/s observando así una mejoría del 25%.

En la figura 70 se observa la gráfica de la velocidad vs la profundidad para cada una de las fases, para la fase I (antes de la perforación), fase II (durante la perforación), fase III (tensionada una fila de anclajes) y finalmente la fase IV (tensionada las cuatro filas de anclajes), donde se puede apreciar lo descrito anteriormente.

Figura 70. Grafica de la velocidad vs la profundidad de todas las fases.



Con lo anterior, se puede concluir que el conjunto de los procesos PIT mejoran las propiedades del suelo mecánicas, físicas, etc, sin embargo, durante el proceso de perforación (fase II) las propiedades del suelo disminuyen.

Con el fin de observar los efectos de las vibraciones generadas por la maquinaria de construcción de anclajes activos, a continuación, se realizará el cálculo de la frecuencia natural del suelo durante la perforación vs la frecuencia del equipo de perforación utilizada en la construcción de estos anclajes.

- ✓ Frecuencia natural del suelo:

$$fn = \frac{Vs}{4 * H}$$

Dónde: vs: es la velocidad de onda cortante [m/s]
H: espesor de la capa correspondiente [m]

$$\rightarrow fn = \frac{280}{4 * 2} = 35{,}00\ [Hz]$$

- ✓ Frecuencia del equipo de perforación:

El martillo utilizado para la construcción de los anclajes activos en el proyecto torres de Monterredondo es un martillo neumático atlas copco cop35, por lo tanto su frecuencia varía entre 1600 a 3400 RPM, sin embargo para el presente documento se tomará un promedio el cual corresponde a 2500 RPM o 33,33 Hz.

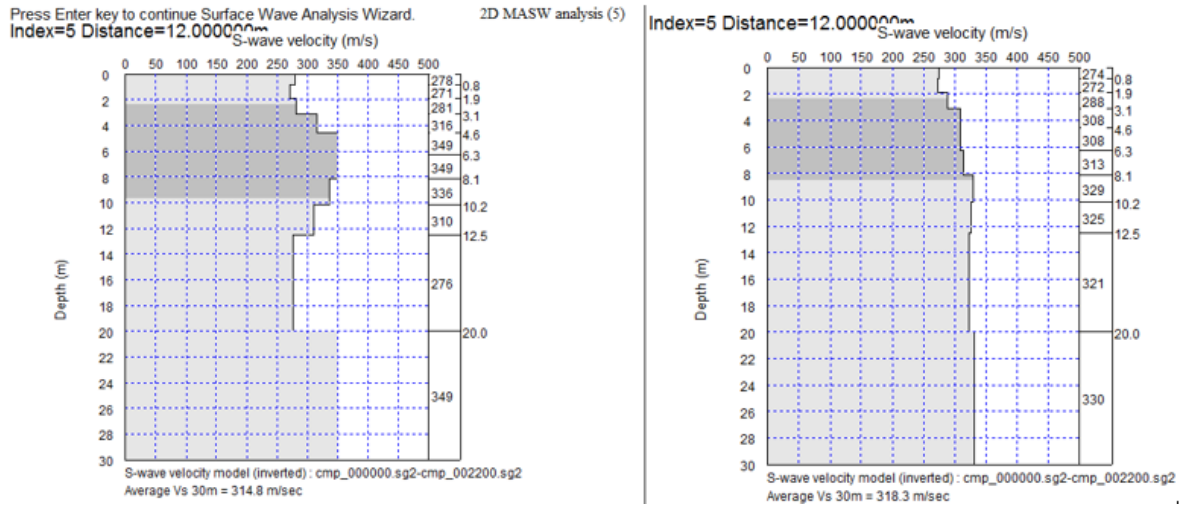
En la figura 71 se observa un resumen de las frecuencias naturales calculadas durante la perforación de los anclajes vs la frecuencia del equipo de perforación.

Figura 71. Cálculo de la frecuencia natural vs frecuencia del equipo de perforación.

H	Vs [m/s]	f [Hz]	f maquina [Hz]
2	280	35,00	33,33
8	290	9,06	33,33
20	320	4,00	33,33

Como resultado, se puede evidenciar que en los dos primeros metros mientras se realiza la perforación de los anclajes activos, se observan frecuencias muy similares, lo cual puede llegar a producir un efecto de resonancia, ocasionando daños superficiales como grietas y/o fisuras a las estructuras vecinas. Adicionalmente, si se comparan los resultados obtenidos después del procesamiento de datos en el ensayo MASW se puede observar que en los primeros dos metros se pasa de 278 m/s correspondiente a la fase I (antes de iniciar perforación) a 274 m/s correspondiente a la fase II (durante el proceso de perforación); por lo que nuevamente se puede evidenciar que el proceso de perforación está afectando las estructuras aledañas ya que existe una afectación superficial del suelo (los primeros dos metros). En la figura 72 se puede observar la comparación de resultados entre antes y durante el proceso de perforación tomados con el ensayo MASW.

Figura 72. Comparación de resultados antes y durante el proceso de perforación con el ensayo MASW.



FUENTE: INGEOTECNIA.

6 SIMULACIÓN NUMÉRICA CON PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

En el programa PLAXIS 2D a través del modelo elástico-lineal con plasticidad perfecta Mohr-Coulomb se realizó la modelación de los resultados obtenidos de los ensayos REMI antes de intervenir el suelo [fase I], cuando se realiza la primera excavación aproximadamente 2.5 metros [fase II], con una fila de anclajes tensionado [fase III] y con la totalidad de la pantalla tensionada (4 filas) [fase IV]. Los modelos realizados anteriormente son con el fin de observar las deformaciones en cada una de las fases y observar los respectivos resultados.

Para obtener los parámetros y/o propiedades del suelo en cada una de las fases, se partió del ensayo de suelos realizado inicialmente para los parámetros c': $cohesión, \emptyset'$: $ángulo\ de\ fricción\ efectivo, \varphi$: $dilatancia$,∪: $relación\ de\ poisson$, y para el módulo de elasticidad en cada una de las fases, se calcula a través de las velocidades de corte obtenidas como resultados de los ensayos REMI según la fase correspondiente. Para todas las fases no se tiene en cuenta el nivel freático debido a que según el estudio de suelos en este lugar no se cuenta con la presencia de agua.

A continuación se realiza un ejemplo del cálculo del módulo de elasticidad para una velocidad de corte de 270 m/s.

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

Para un $\gamma = 18{,}06\ Kn/m3$

$$\rho = \frac{18{,}06}{9{,}8} = 1{,}84\ KN * s^2/m^4$$

$$G = \rho * Vs^2$$

$$G = 1{,}84 * 270^2 = 134344{,}29\ KN/m2$$

$$E = G * 2(1 + \cup)$$

$$E = 134344{,}29 * 2(1 + 0{,}2) = 322{,}4\ MPa$$

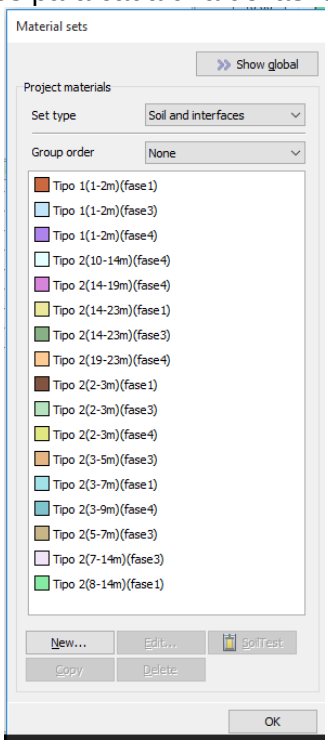
Sin embargo, como son velocidades dinámicas se estima que el valor estático es alrededor del 10% del valor a muy pequeñas deformaciones.

$$E = 322{,}4 * 0{,}1 = 32{,}24\ Mpa$$

Lo descrito anteriormente se realiza en cada cambio de velocidad a la profundidad correspondiente en cada fase descrita.

En la figura 73 se observa la creación de todos los materiales en el programa PLAXIS 2D para cada una de las fases.

Figura 73. Creación de materiales para cada una de las fases.



6.1 FASE I

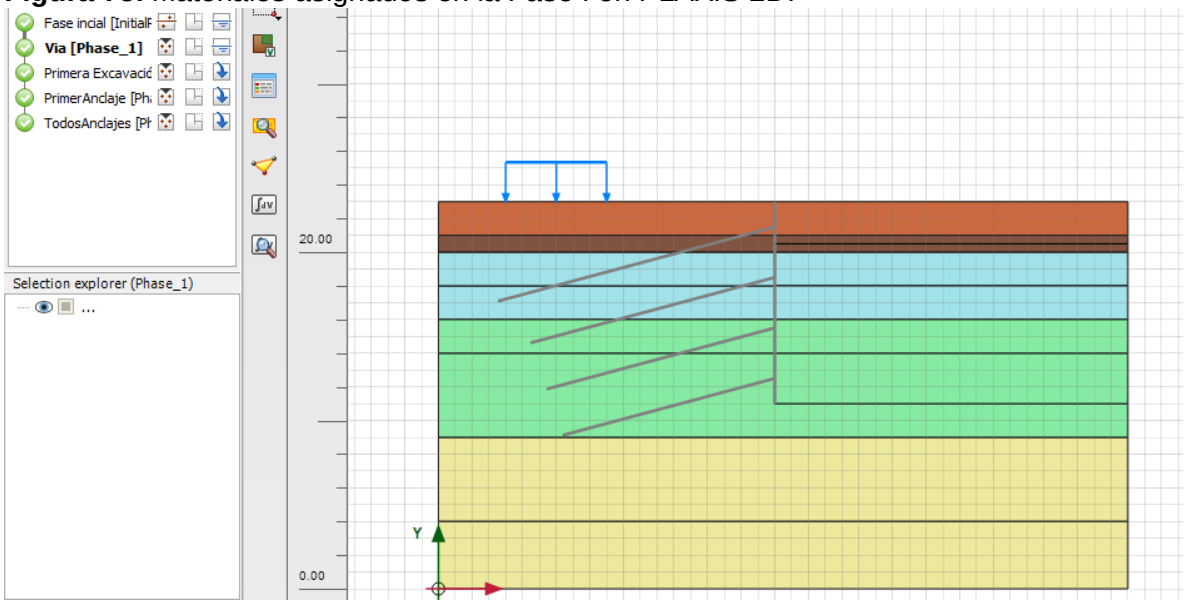
En la fase I, se realiza la modelación en PLAXIS 2D cuando no se tiene ninguna alteración del suelo, es decir en su estado inicial, asignando una carga distribuida de 24 Ton/m2 al talud, producto de la vía presente. En la figura 74 se muestra las propiedades del suelo que se le ingresan al programa.

Figura 74. Propiedades del suelo en la Fase I.

	ψ	0	
	υ	0,2	
Profundidad [m]	C' [Kn/m2	ϕ' [°]	E [Mpa]
1	12	29	32,24
2			
3	15	33	33,92
4			
7			
8			41,88
10			
14			
15			50,67
20			
23			

En la figura 75 se observa la geometría con los materiales ya asignados en el programa PLAXIS 2D.

Figura 75. Materiales asignados en la Fase I en PLAXIS 2D.

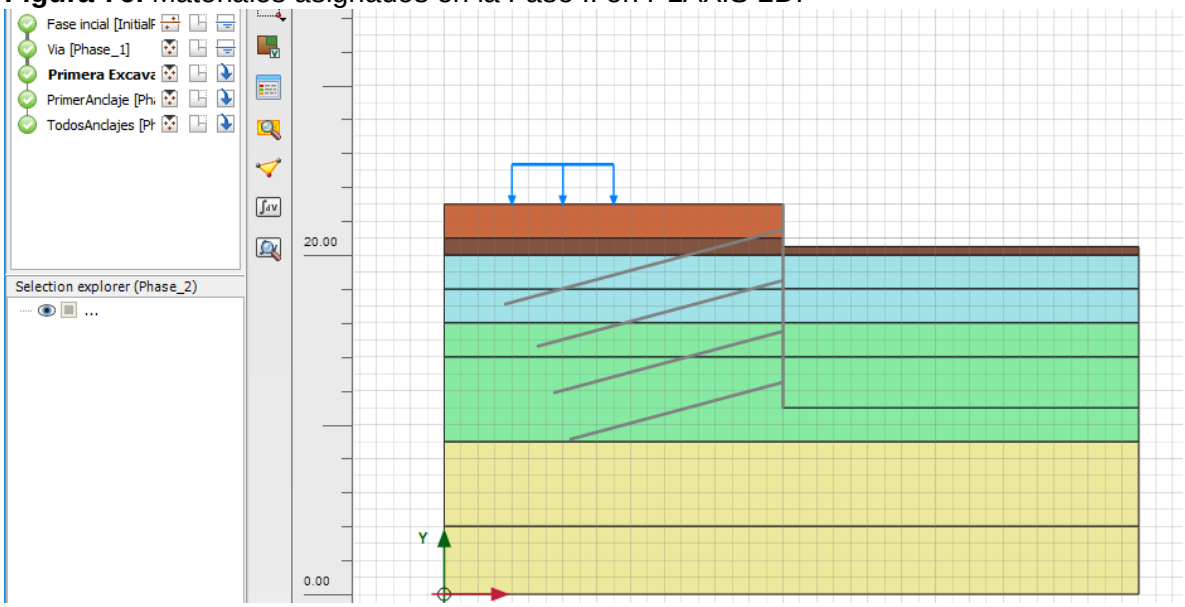


6.2 FASE II

En la fase II, se realiza la modelación en PLAXIS 2D cuando se tiene la excavación para la construcción de la primera fila de anclajes (aproximadamente 2,5 m), donde los parámetros del suelo son los asignados en la Fase I.

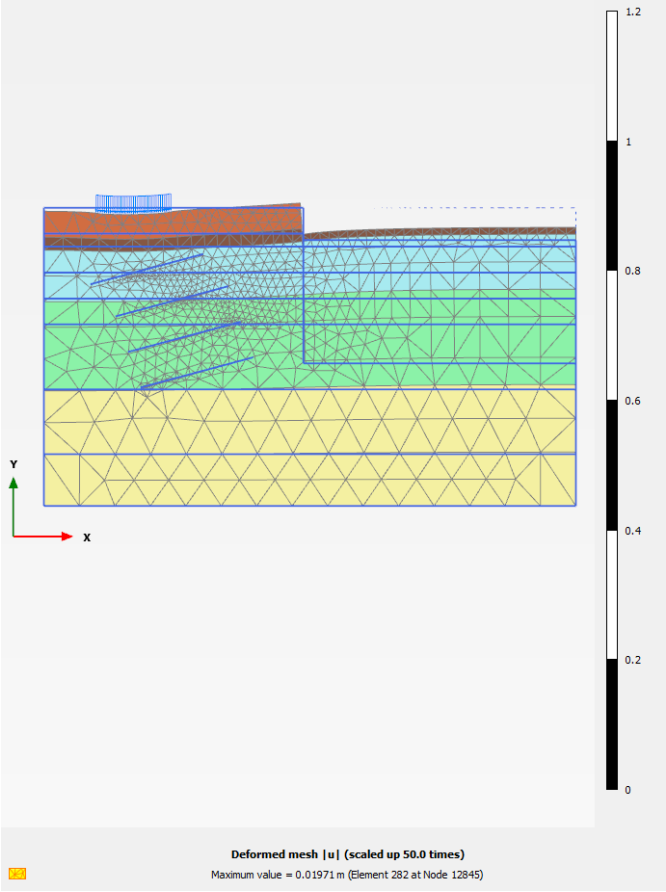
En la figura 76 se observa la geometría con los materiales ya asignados y la excavación realizada a 2,5 m de profundidad en el programa PLAXIS 2D.

Figura 76. Materiales asignados en la Fase II en PLAXIS 2D.



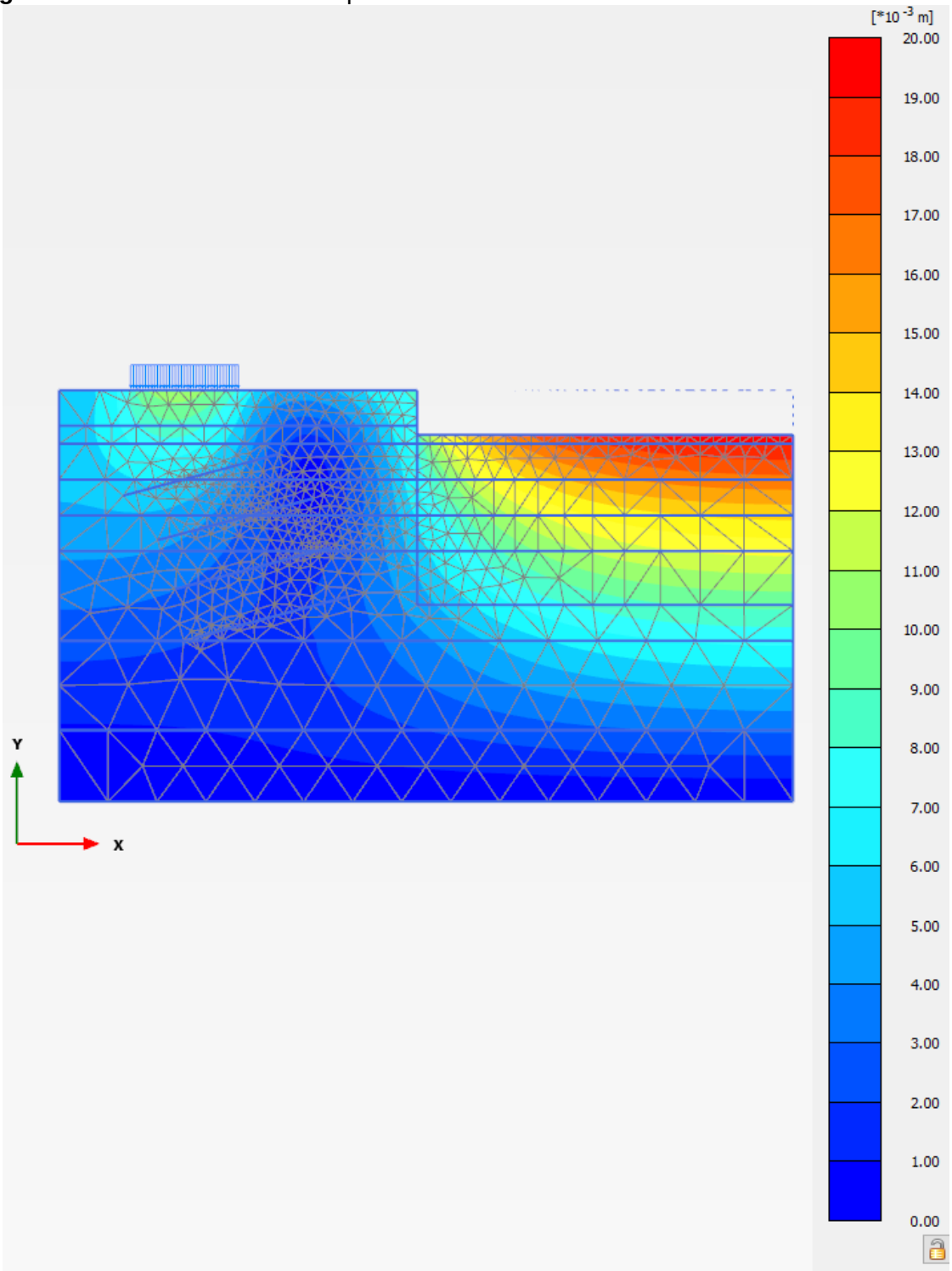
En la figura 77 se observa los resultados de la deformación de la malla en la fase II.

Figura 77. Resultados de la deformación de la malla en la fase II.



Finalmente, en la figura 78 se observa los desplazamientos totales en la fase II.

Figura 78. Resultados de los desplazamientos totales en la fase II.



6.3 FASE III

En la fase III, se realiza la modelación en PLAXIS 2D cuando se tiene la primera fila de anclajes tensionada. En la figura 79 se muestra las propiedades del suelo que se le ingresan al programa.

Figura 79. Propiedades del suelo en la Fase III.

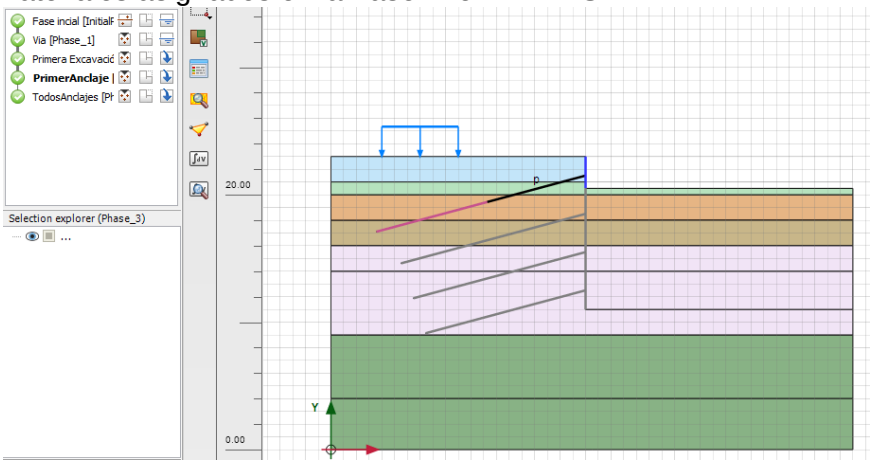
	ψ	0	
	υ	0,2	
Profundidad [m]	C' [Kn/m2	ϕ' [°]	E [Mpa]
1	12	29	39,81
2			
3	15	33	
4			41,88
7			67,19
8			74,45
10			
14			
15			57,00
20			
23			

Debido a que en esta fase se debe modelar con la primera fila de anclajes tensionada, se toman los datos descritos en el estudio geotécnico de la empresa INGEOTECNIA realizado para este proyecto.

- ✓ Profundidad: 1,5 metros.
- ✓ Carga: 32 TON.
- ✓ Longitud total: 17 metros.
- ✓ Longitud Bulbo: 9 metros.
- ✓ Número y diámetro del torón: 3 torones de 5/8”.

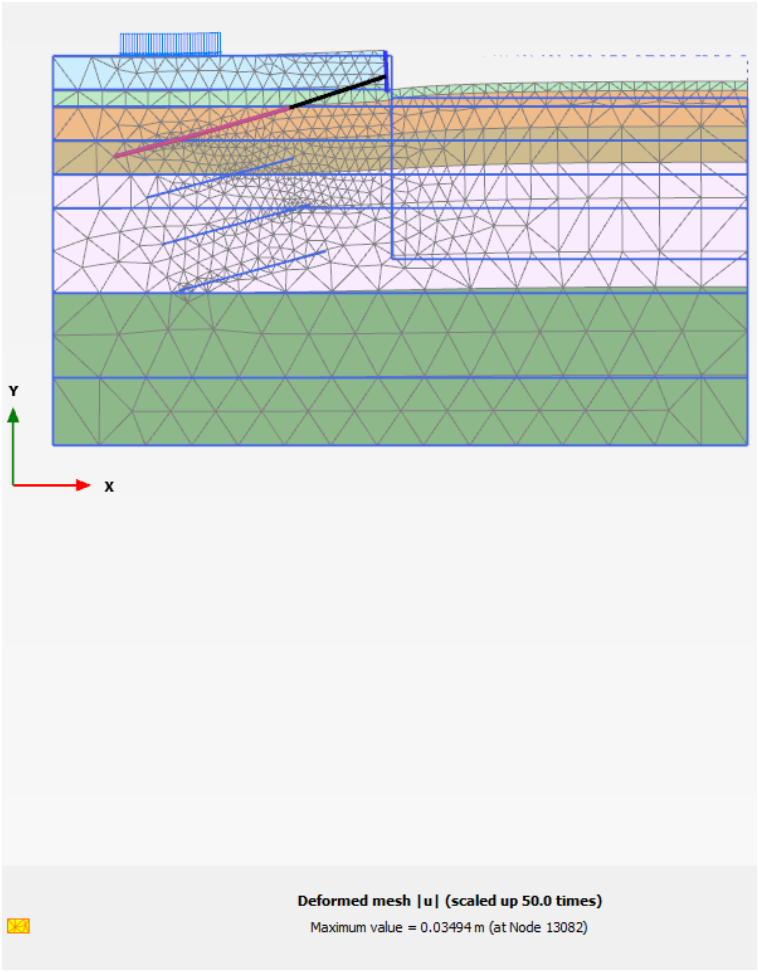
En la figura 80 se observa la geometría con los materiales ya asignados y con la construcción y tensionamiento de la primer fila de anclajes en el programa PLAXIS 2D.

Figura 80. Materiales asignados en la Fase III en PLAXIS 2D.



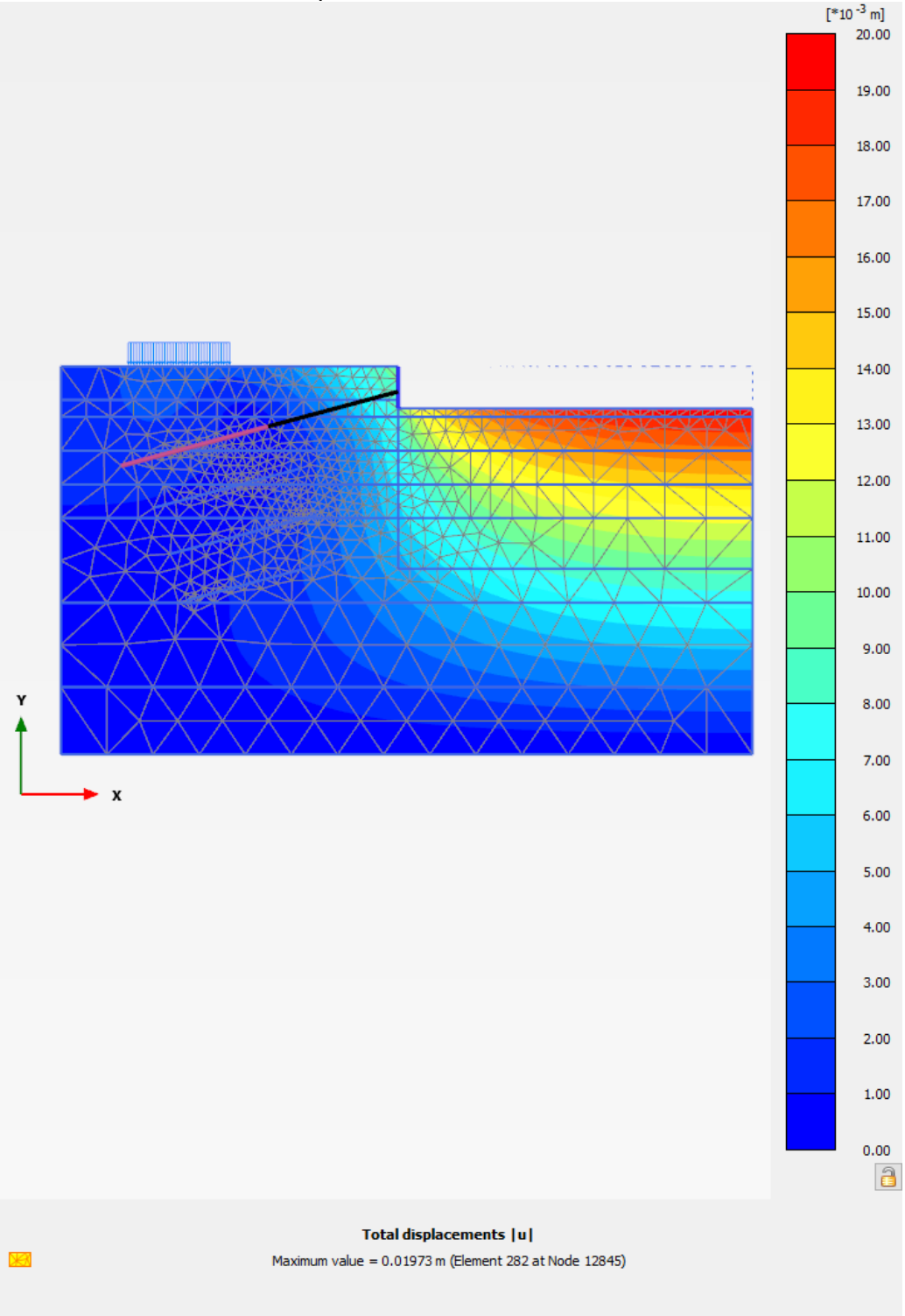
En la figura 81 se observa los resultados de la deformación de la malla en la fase III.

Figura 81. Resultados de la deformación de la malla en la fase III.



Finalmente, en la figura 82 se observa los desplazamientos totales en la fase III.

Figura 82. Resultados de los desplazamientos totales en la fase III.



6.4 FASE IV

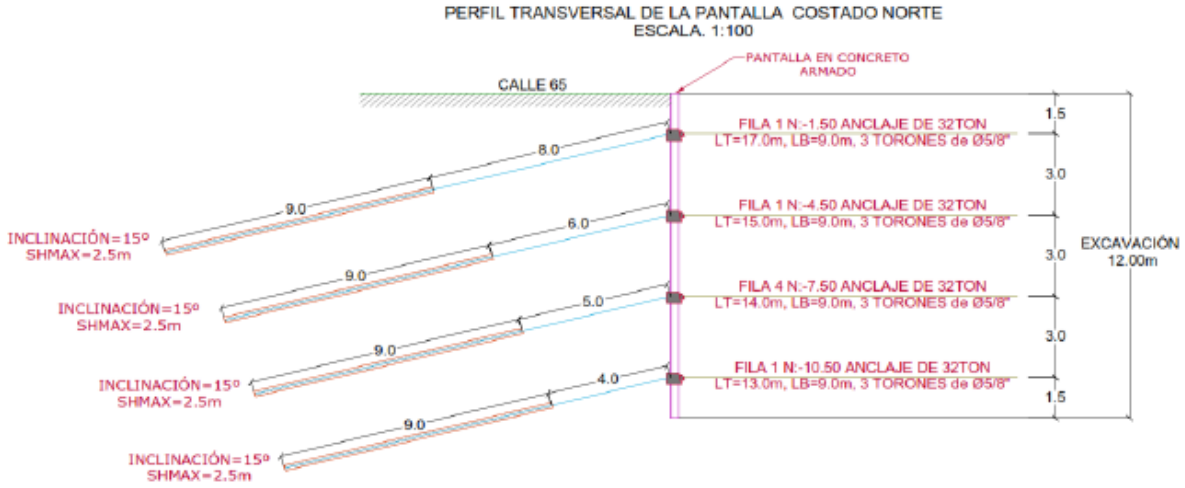
En la fase IV, se realiza la modelación en PLAXIS 2D cuando se tienen las cuatro filas de anclajes tensionadas. En la figura 83 se muestra las propiedades del suelo que se le ingresan al programa.

Figura 83. Propiedades del suelo en la Fase IV.

	ψ	0	
	υ	0,2	
Profundidad [m]	C' [Kn/m2	ϕ' [°]	E [Mpa]
1	12	29	51,13
2			
3	15	33	78,22
4			
7			
9			
10			50,67
14			
15			40,77
19			
20			50,67
23			

Debido a que en esta fase se debe modelar las cuatro filas de anclajes tensionadas, se toman los datos descritos en el estudio geotécnico de la empresa INGEOTECNIA realizado para este proyecto (figura 84).

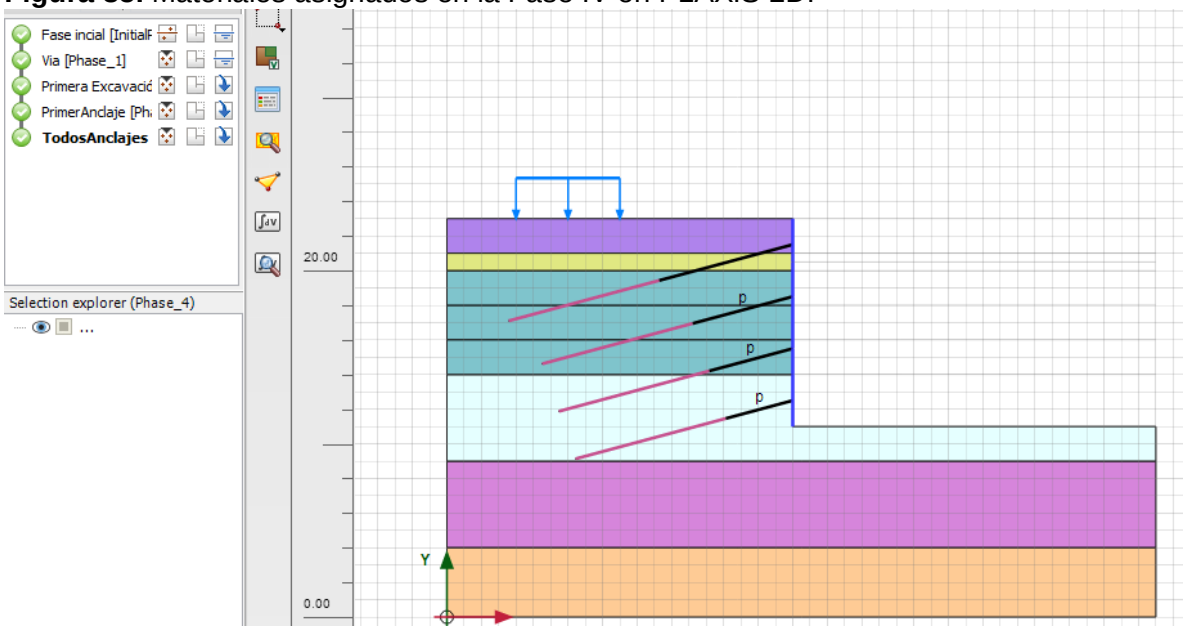
Figura 84. Parámetros de los anclajes.



FUENTE: INGEOTECNIA.

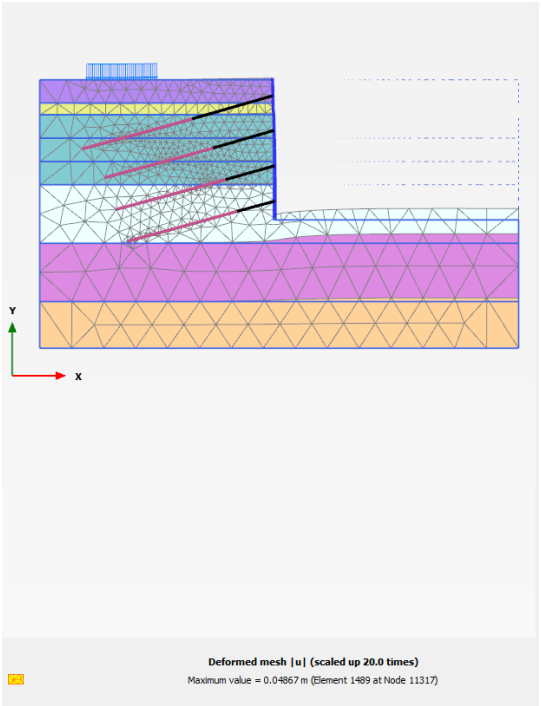
En la figura 85 se observa la geometría con los materiales ya asignados y con la construcción y tensionamiento de las cuatro filas de anclajes en el programa PLAXIS 2D.

Figura 85. Materiales asignados en la Fase IV en PLAXIS 2D.



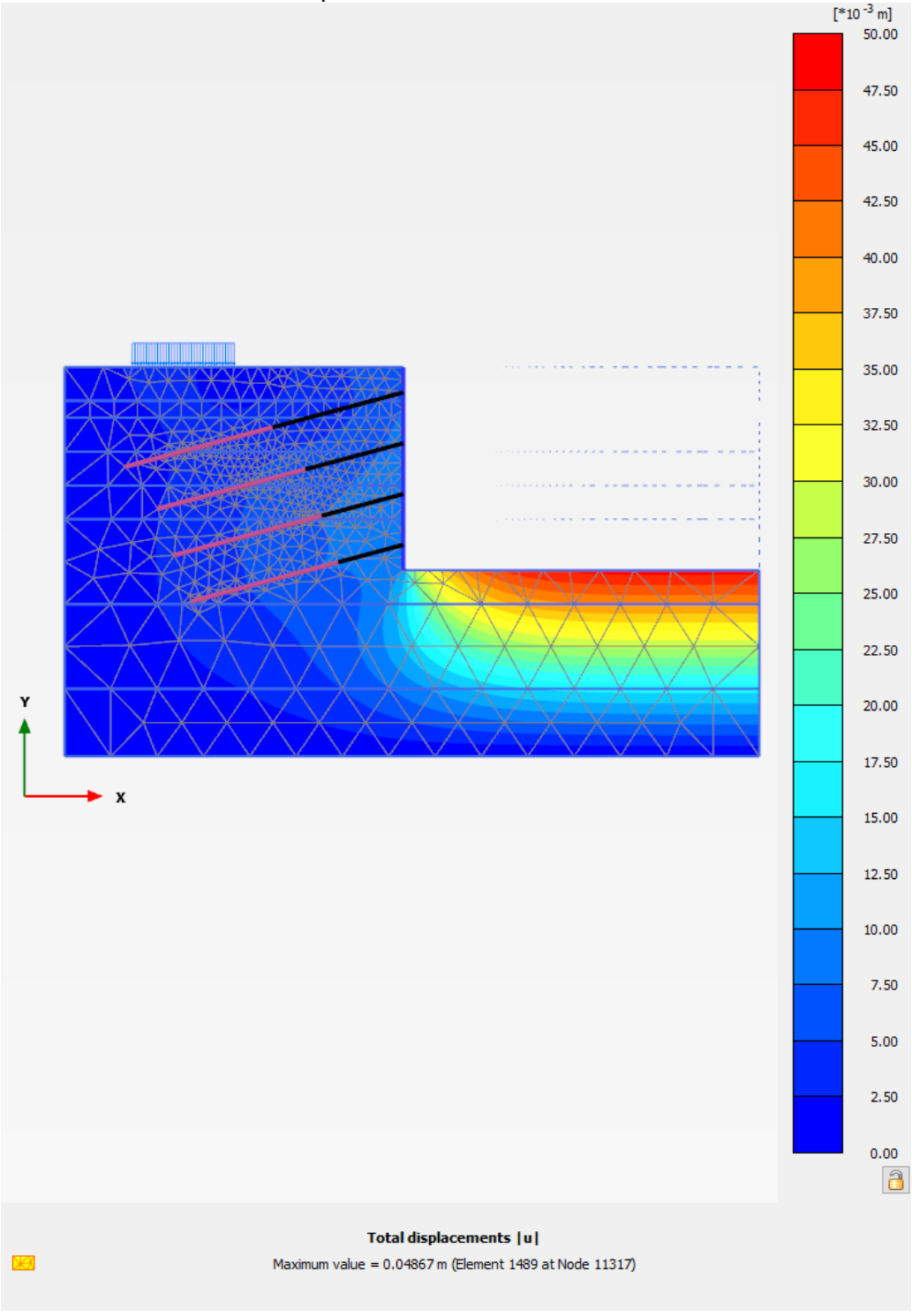
En la figura 86 se observa los resultados de la deformación de la malla en la fase IV.

Figura 86. Resultados de la deformación de la malla en la fase IV.



Finalmente, en la figura 87 se observa los desplazamientos totales en la fase IV.

Figura 87. Resultados de los desplazamientos totales en la fase IV.



En la figura 88 se puede observar el valor de los desplazamientos en la profundidad como varía en cada una de las fases, observando que los desplazamientos o deformación del terreno disminuyen en la profundidad.

Figura 88. Desplazamientos verticales en cada una de las fases.

Profundidad [m]	Desplazamientos [m]		
	Fase II	Fase III	Fase IV
0	0,02	0	0
2	0,015	0,02	0
6,5	0,013	0,015	0
7	0,011	0,012	0
12	0,009	0,009	0,05

7 CONCLUSIONES

- ✓ Se identificó con el uso de los ensayos REMI y MASW que las características del suelo varían dependiendo de la fase de construcción de los anclajes. Durante el proceso de perforación se generan afectaciones al suelo, sin embargo, con los procesos de inyección y tensionamiento las características mejoran en comparación a las iniciales. Se logró evidenciar que las afectaciones al suelo durante el proceso de perforación pueden ser del orden de una disminución del 5% de la velocidad de corte inicial del suelo. Sin embargo, después de los procesos PIT (perforación, inyección y tensionamiento) se obtuvieron mejoras significativas en el suelo obteniendo una mejoría del 50% en los primeros 6 metros de profundidad. Entre los 6 y 12 metros una mejora del 15% y en los últimos metros un aumento de velocidad de corte de aproximadamente el 25%. Lo anterior se puede justificar como producto de la lechada inyectada al suelo lo que permite una reducción de poros y por ende una mejor uniformidad y al proceso de tensionamiento que ayuda a confinar el suelo.

- ✓ Se verificó que las pantallas ancladas presentan un buen funcionamiento debido a que los desplazamientos son mínimos siempre y cuando el proceso se realice adecuadamente, tal como se evidencia en los modelos de elementos finitos realizados. Sin embargo, se debe aclarar que la maquinaria para la perforación de los anclajes está ocasionando afectaciones al suelo ya sea por la vibración de la maquinaria de perforación o por la imprimación de aire y con ello se generan fisuras o grietas en las estructuras, si a esto se le suman otros factores tales como virtudes del operador, tipo de compresor usado, tipo de martillo (bajas o altas frecuencias) se puede llegar a concluir que son diversas las variables para una adecuada ejecución de un proceso de estabilización, por tal razón en los suelos superficiales donde están sueltos, se requiere tener precaución con la frecuencia o velocidad que se utilice en los equipos con el fin de disminuir las posibles afectaciones. Lo anterior se debe que al comparar la frecuencia natural del suelo vs la frecuencia del equipo de perforación en los primeros metros se observan frecuencias muy similares, por lo que puede ocurrir el fenómeno de resonancia, ocasionando fisuras y/o grietas a las estructuras vecinas.

- ✓ Se identificó con la ayuda del programa PLAXIS 2D que sí se presentan cambios en el módulo de deformación durante el proceso constructivo de los anclajes activos; donde a medida que se va realizando el proceso de tensionamiento de las cuatro filas de anclajes el módulo de deformación

aumenta, lo que quiere decir que el suelo se vuelve más rígido y por ende mejora sus características a las iniciales disminuyendo los desplazamientos o deformación del terreno en la profundidad.

- ✓ Se determinó que los principales procesos de estabilización de excavaciones en el ámbito nacional son los anclajes pasivos, los anclajes activos y los micropilotes. Además, como es de esperarse existen diversos factores que afectan o determinan el diseño y el tipo de estabilización a utilizar en una obra, ya sean las características del suelo, presupuesto disponible para la excavación, velocidad de ejecución, entre otras.

- ✓ Se identificaron diversos factores que son determinantes para definir el tipo de ensayo geofísico a utilizar, sin embargo el más importante es la localización del terreno en estudio. Por un lado el uso del ensayo REMI es recomendado en zonas urbanas donde la lectura de las frecuencias pueden ser tomadas tanto por las ondas ambientales como artificiales (impactos, vehículos en circulación, explosiones, uso de maquinaria, otras). Por otro lado, el ensayo MASW es recomendado en zonas rurales donde existe poco ruido externo y por ende la necesidad de generar ondas artificiales, como es el producido por el impacto entre la platina y el martillo usado en este tipo de ensayo.

- ✓ Después de realizado el proceso de perforación, inyección y tensionamiento de los anclajes activos se logró evidenciar que no hubo afectaciones en la vía colindante a la pantalla anclada, lo que puede ser producto de que la base y subbase presentes en la vía están lo suficientemente compactadas como para evitar afectaciones al suelo. Debido a lo anterior surge la posibilidad de plantear como afectación la mala compactación del suelo que pueden existir en viviendas principalmente de tapia pisada y producto a ello generar daños en elementos tanto estructurales como no estructurales.

RECOMENDACIONES

- ✓ Debido a la experiencia obtenida en obra se puede concluir que las estructuras construidas en tapia pisada o materiales muy frágiles a desplazamientos o movimientos en el suelo son susceptibles a sufrir afectaciones producto de los procesos de estabilización de excavaciones. Por otro lado aquellas estructuras que cumplen con las normas de diseño generalmente no presentan afectaciones o si presentan son a menor escala.

- ✓ Adicionalmente se observa que otro de los factores que puede provocar afectaciones en estructuras vecinas se debe al suelo suelto producto de cañerías rotas, mala estructuración de las mismas, conformación de suelo no compactado, entre otras deficiencias producto del paso de los años y de malos hábitos de construcción en las viviendas aledañas.

- ✓ El presente proyecto puede servir como base para investigaciones futuras en otros tipos de suelos con el fin de determinar si efectivamente existen cambios en las velocidades de corte en todos los suelos producto de los procesos de perforación, inyección y tensionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO ZAPATA, J; BOIXADER CAMBRONERO, D. Calculo de soil nail walls o muros anclados con hormigón proyectado. Estructurando. Noviembre 2013.

ALVAREZ REVUELTA, M**.** Determinación de la amplificación sísmica local en el campus Sur UPM mediante la técnica de sismología de microtremores ReMi. Universidad Politécnica de Madrid. España, 2015.

APONTE GONZALEZ, J. Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, 2011.

CABALLERO OLARTE, J. Valoración de diferentes opciones para estabilización del talud ubicado en el K8 + 600 en la vía doble calzada Bucaramanga- Cúcuta. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, 2014.

CONDE GARZON, J; ALVAREZ PRADA, J. Estudio de estabilidad de un talud ubicado en el barrio Bellavista del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Abril, 2014.

DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS**.** Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera. Madrid, Enero 2001.

FLORES RUGELES, L; HERNANDEZ JOYA, C. Estudio sobre el diseño y construcción de anclajes como elementos de estabilización de taludes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002.

GEOFORTIS, SOLUCIONES GEOTECNICAS CONFIABLES. Procedimiento constructivo: muro anclado. Alajuela, Costa Rica.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Anclajes. Artículo 623-07

JAIMES VILLAMIZAR, J. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2011.

LEON, RICARDO. Remi (Refraction microtremor) Geofísica consultores.

LINARES MONTENEGRO, G. Introducción y aplicación del método de sísmica de microtemores en áreas urbanas. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Noviembre 2005.

LORENZO FERRÁS, ARTURO. Breve cronología de los métodos geofísicos. Programa de formación Iberoamericano en materia de aguas. Ciudad de la Habana, Cuba.

MANILLA ACEVES, ALFONSO. Geofísica aplicada en los proyectos básicos de Ingenieria Civil. Instituto Mexicano del transporte. Publicacion tecnica No 229. Sanfandila, Qro, 2003.

MINISTERIO DE FOMENTO. Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005.

MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007.

MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Anclajes al terreno.

MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A**.** Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010.

ORDOÑES, FRANCISCO. Ensayos geofísicos Remi-tomografia líneas L1 y L2 proyecto planta de tratamiento la pradera. Intensa Ingeniería Inteligente. Octubre 2013.

PADRON LUGO, M. Caracterización geofísica del suelo somero mediante ReMi en el área metropolitana del Norte de Anzoátegui. Universidad Simón Bolivar. Sartenejas, Octubre 2012.

PEREDO ANDRADE, V. Aplicación del método SASW en suelos. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Abril 2011.

PINILLA RAMOS, C. Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuestas en suelos. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Enero 2012.

RICO ALBARRACIN, J. Elaboración de un manual para la estabilización de taludes por medio de pantallas ancladas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2012.

ROS ESTEBAN A. Manual de anclajes para mineria y obra civil. Universidad Politecnica de Cartagena. 2006.

SUAREZ, J. Deslizamiento. Analisis geotecnico. Volumen I editorial UIS escuela de filosofia. 2009.

SUAREZ, J. Estructuras ancladas pretensadas. Deslizamientos: Técnicas de remediación. Capítulo 4.

TRX-NEXT GROUP. Advanced geophysics & integrated geo sciences technologies. Método sísmica Remi (Refracción por micro tremores) análisis de ondas superficiales- sísmica pasiva. Agosto 2012.

UCAR NAVARRO, R. Manual de anclajes en obra de tierras. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 2002.

ANEXOS

ANEXO A. PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN EN EXCAVACIONES

Dentro de los procesos de estabilización que se realizan a las excavaciones durante la construcción de edificios, se encuentran los anclajes activos, anclajes pasivos y los micropilotes. En el presente capitulo se explicará cada uno de estos procesos de estabilización con un enfoque más detallado en los anclajes activos debido a que estos corresponden al objetivo general del presente documento, sin dejar a un lado los micropilotes y anclajes pasivos.

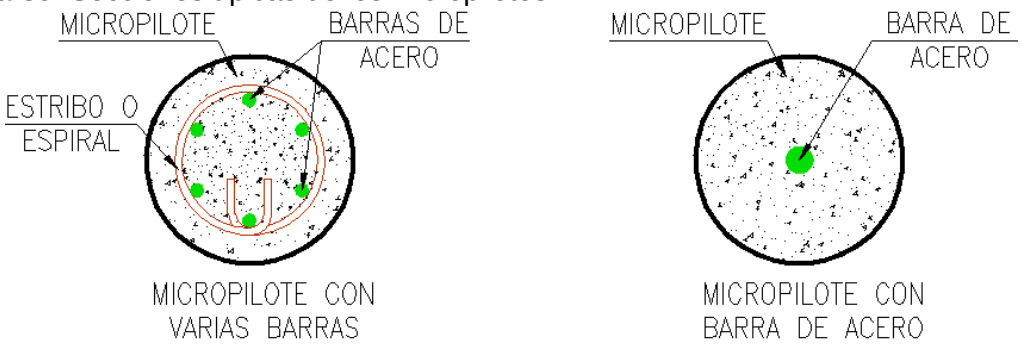
MICROPILOTES

A continuación, se realizará una breve definición de los micropilotes, sus principales usos y proceso constructivo. Es importante tener en cuenta que los micropilotes son elementos cilíndricos que presentan una gran esbeltez, debido a la relación entre longitud y diámetro (aproximadamente 30 cm de diámetro).

INTRODUCCIÓN

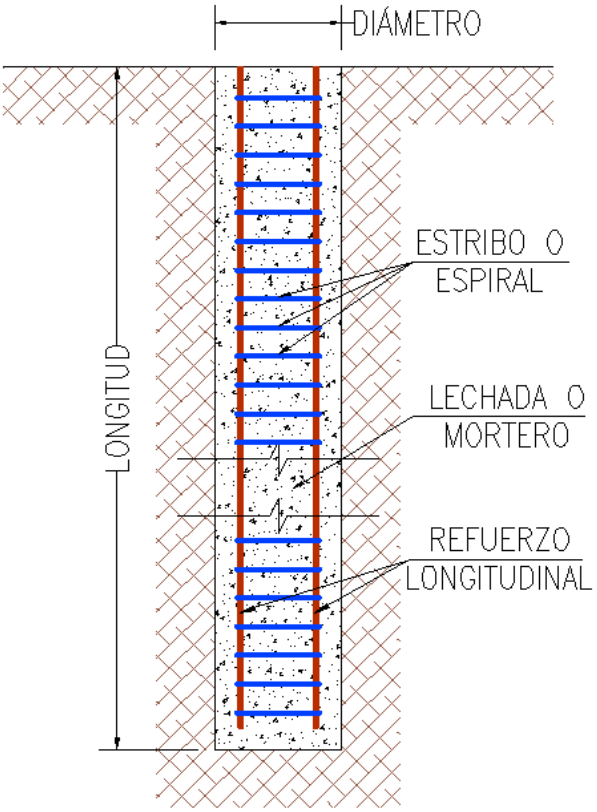
Los micropilotes son originarios de Italia y su incorporación fue realizada entre el periodo de 1950 a 1952. Sin embargo, la primera referencia bibliográfica encontrada data del año 1993 en el libro de Sansón donde se detalla la construcción de estos elementos por medio de una armadura central, conformada por una o más barras de acero y un llenado con mortero realizado a presión con la ayuda de aire comprimido.
En la figura 89 se observan las dos principales tipologías de los micropilotes, donde se puede observar un elemento conformado por varias barras de acero y otra con una barra principal.

Figura 89. Secciones típicas de los micropilotes



Los micropilotes son similares a los anclajes en lo concerniente a la función que desempeñan, ya que estos sirven para transmitir cargas o estabilizar terrenos con la ayuda de elementos introducidos en el suelo a profundidades considerables.
Sin embargo, geométricamente presentan algunas variaciones, en la figura 90 se observan las principales partes de los micropilotes.

Figura 90. Principales partes de los micropilotes.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO. Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.130.

CLASIFICACIÓN

Existen diversas clasificaciones de los micropilotes según varios autores, las cuales se citan a continuación:

- ✓ Según su forma de transmisión de esfuerzos al suelo: pueden ser clasificados como individuales o en grupo. Los micropilotes individuales son usados principalmente en cimentaciones profundas y trabajan por fricción y punta. Por otro lado, los micropilotes en grupo pueden ser usados tanto para

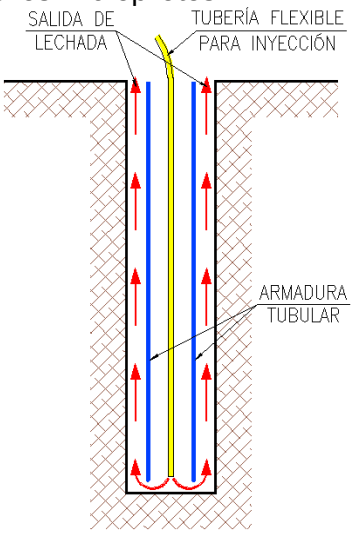
cimentaciones como para la estabilización de suelos en procesos de excavación.

- ✓ Según el tipo de esfuerzos a los que están sometidos: pueden clasificarse en micropilotes de esfuerzos axiales, de esfuerzos cortantes y de momentos flectores. Los micropilotes de esfuerzos axiales son aquellos que trabajan principalmente tanto a tracción como a compresión, y son usados principalmente en cimentaciones de puentes, ya sean en pilas o estribos. Por otro lado, existen micropilotes que son sometidos a los tres tipos de esfuerzos, como es el caso de aquellos usados para la estabilización de laderas o excavaciones.

- ✓ Según el sistema de inyección: pueden ser micropilotes inyectados, reinyectados (hasta dos veces) y en ocasiones micropilotes de inyección repetitiva, que tal como su nombre lo indica consisten en elementos que presentan varias fases de inyección.

  En la figura 91 se observa el proceso de inyección de los micropilotes con ayuda de una tubería flexible. Como se puede observar la inyección es realizada desde la parte más profunda de la perforación con el fin de lograr que la lechada inyectada ascienda hasta la parte superficial del elemento. Este proceso es realizado tanto en micropilotes inyectados como en la primera fase de los micropilotes reinyectados y de inyección repetición repetitiva.

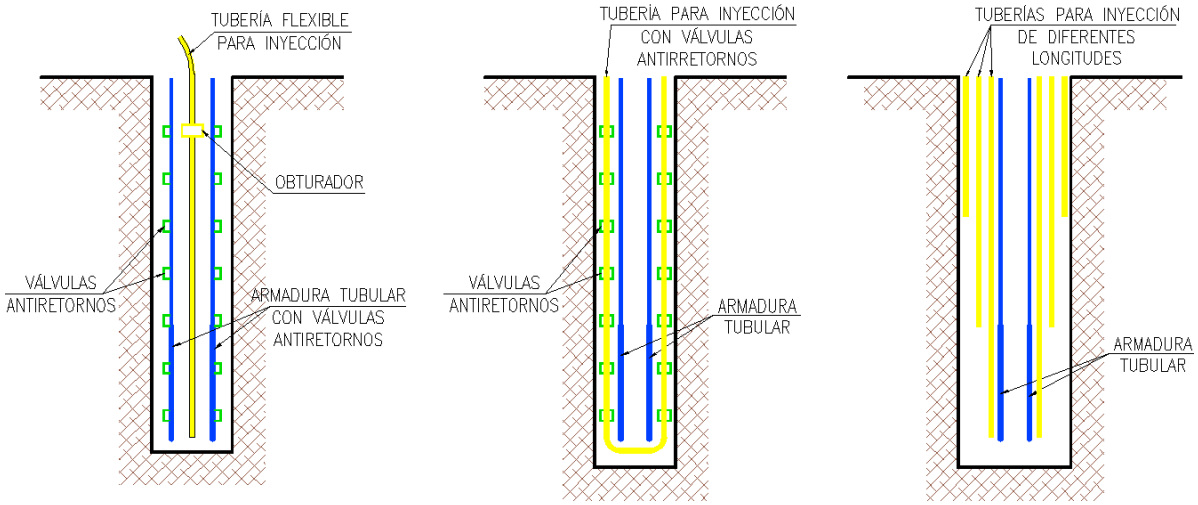
Figura 91. Proceso de inyección de los micropilotes.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p. 132.

En la figura 92 se observan tres diferentes procesos de reinyección. El primero consiste en usar una tubería con válvulas antirretornos por medio de las cuales es inyectada la lechada al micropilote con ayuda de un obturador (costado izquierdo de la figura). La segunda, consiste en usar una armadura tubular tradicional y ubicar las válvulas antirretornos en la tubería de inyección las cuales sirven para el llenado del micropilote (zona central de la figura). Finalmente, la tercera alternativa consiste en usar una armadura tubular tradicional y tuberías de inyección de diferentes longitudes, las cuales permitan el correcto llenado del micropilote a diferentes profundidades (costado derecho de la figura)[18].

Figura 92. Proceso de reinyección en los micropilotes.

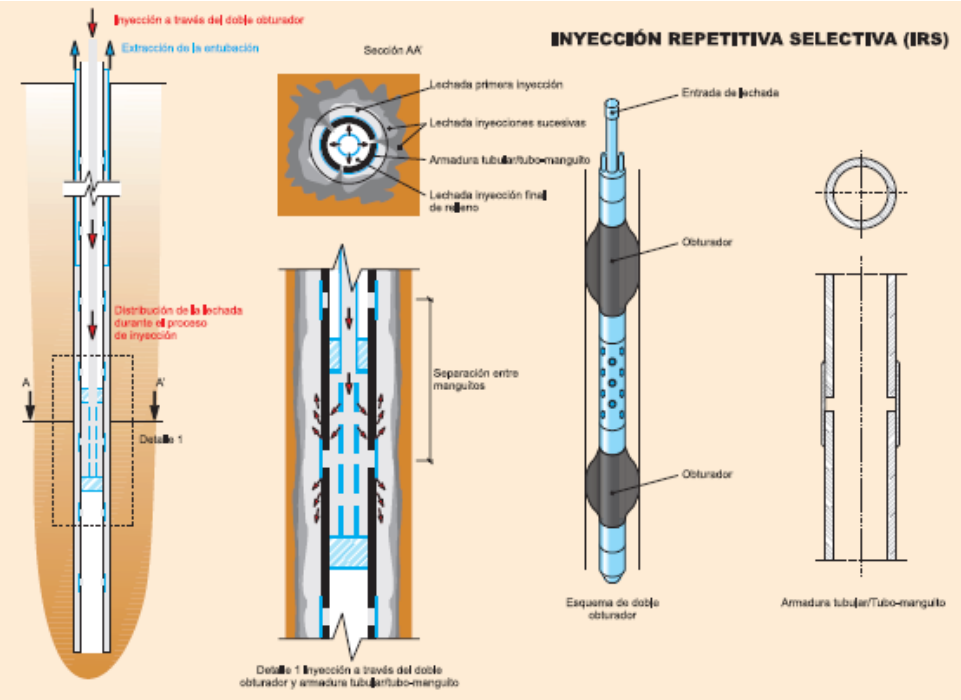


FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.132.

En la figura 93 se observa la tipología y principales partes de los micropilotes usados para procesos de inyecciones repetitivas.

[18] MINISTERIO DE FOMENTO. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.132.

Figura 93. Micropilotes en procesos de inyecciones repetitivas.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.136.

Generalmente se recomienda el uso de micropilotes inyectados cuando se tienen rocas más o menos sanas, suelos cohesivos muy duros y suelos granulares. En el caso de los micropilotes reinyectados pueden ser usados en rocas blandas, fisuradas o en materiales granulares gruesos. Finalmente, los micropilotes de inyección repetitiva suelen ser usados en suelos cohesivos no muy duros, suelos de consistencia baja o media o en suelos granulares donde es común la conformación de un bulbo[19].

Cabe resaltar, que estos elementos pueden ser llenados tanto con lechada como con mortero, cuya principal función es transmitir la carga al suelo por medio de la fricción (por esto se vuelve necesario el uso de acero corrugado que garantice una buena adherencia entre el mortero o lechada y el acero del pilote), adicionalmente sirve para evitar el pandeo del refuerzo y a su vez ayudar contra el control de corrosión[20].

[19] Ibíd., p. 136.
[20] ROS ESTEBAN A. Manual de anclajes para mineria y obra civil. Universidad Politecnica de Cartagena. 2006. p. 32.

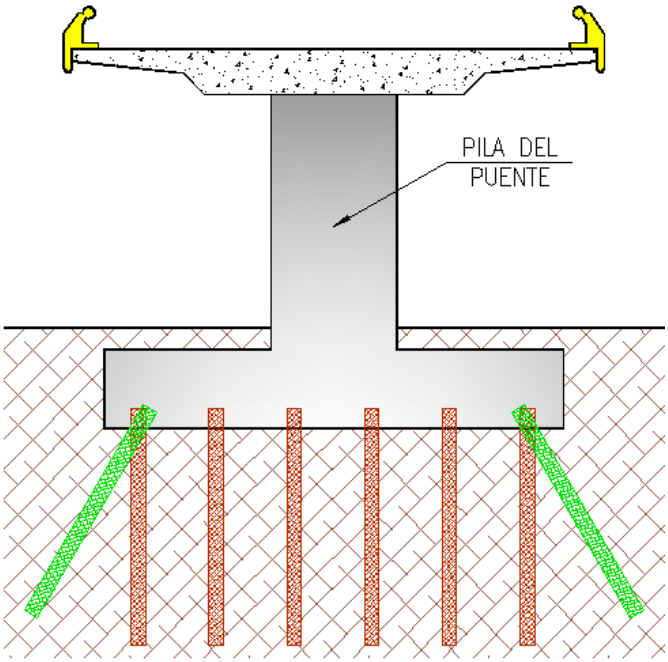
En el caso de usar lechada la relación agua cemento debe estar de 0,40 a 0,55. Cuando se tengan relaciones inferiores a 0,40 se deberá agregar aditivos a la mezcla para permitir una correcta inyección. Cuando es usado el mortero para la inyección se debe mantener una relación agua cemento inferior a 0,60[21].

APLICACIONES DE LOS MICROPILOTES

Dentro de las principales aplicaciones dadas a los micropilotes se encuentran:

- ✓ En cimentaciones y recalces de estructuras: principalmente donde se tienen espacios de trabajo reducidos o suelos rocosos de grandes dimensiones difíciles de perforar. En la figura 94 se observa el uso de los micropilotes para recalce de las pilas en puentes cuando estas requieran una mayor estabilidad.

Figura 94. Aplicación de los micropilotes en el recalce de pilas en puentes.



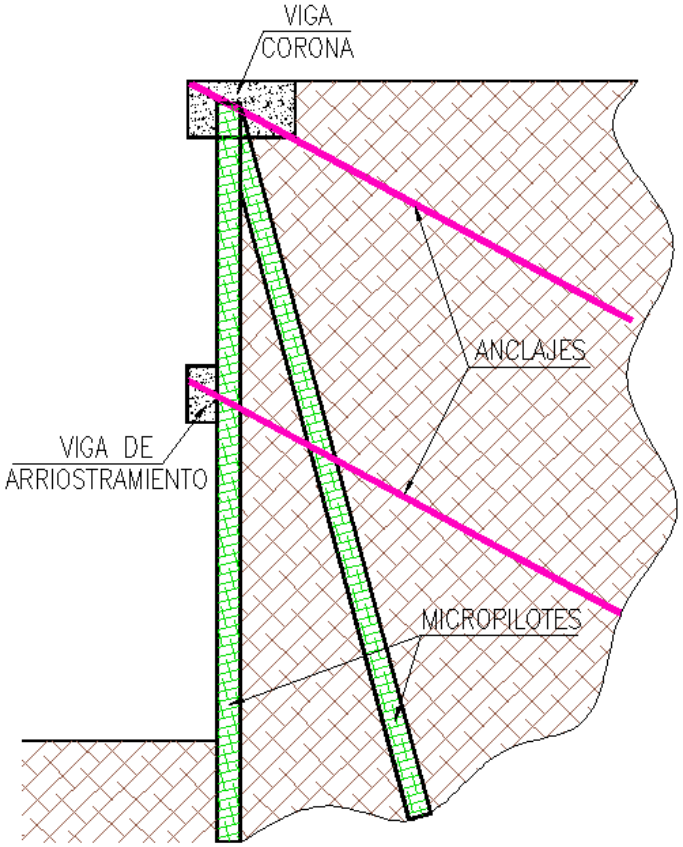
FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.132.

- ✓ En estructuras de contención o estabilización del terreno: donde generalmente es realizada una viga corona y desde allí son perforados los micropilotes con diversas inclinaciones. En la figura 95 se observa la

[21] MINISTERIO DE FOMENTO. Op. cit., p. 135.

construcción de los micropilotes con diferentes ángulos de inclinación los cuales permiten estabilidad en el proceso de excavación de las edificaciones, junto a ello el uso de una viga de arriostramiento y reparto que tiene como objetivo contribuir en la disminución de la esbeltez de estos elementos.

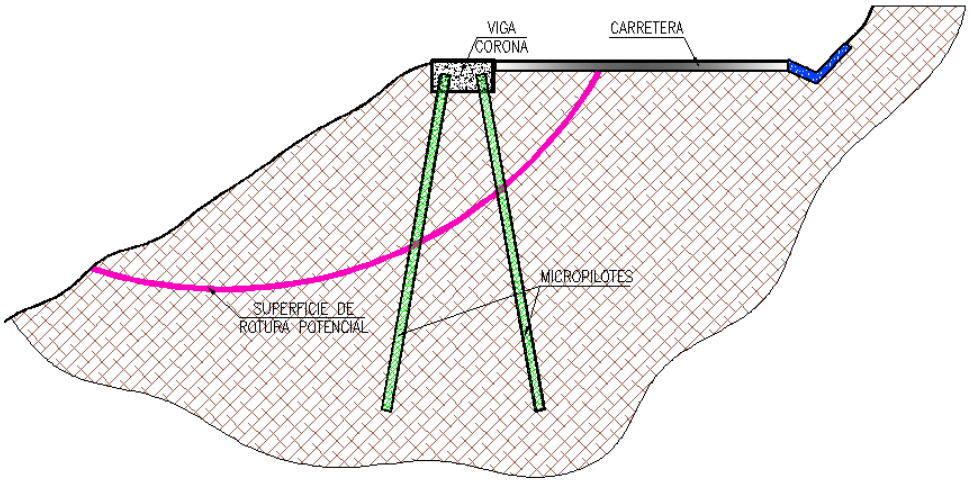
Figura 95. Aplicación de los micropilotes en los procesos de excavación de edificaciones.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.132.

- ✓ Estabilización de taludes o laderas: esta aplicación es similar a la usada en estructuras de contención debido a que se realiza una viga corona desde donde nacen los micropilotes. Sin embargo, esta construcción no presenta viga de arriostramiento ni anclajes. (ver figura 96).

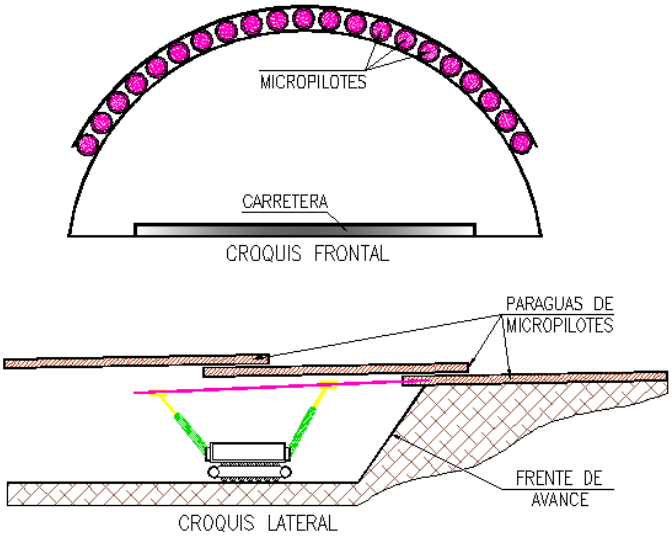
Figura 96. Aplicación de los micropilotes en la estabilización de taludes o laderas.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.132.

- ✓ En el sostenimiento de las bocas de entrada a los túneles: este proceso constructivo es usado con el fin de evitar derrumbes durante la construcción de túneles y su proceso constructivo es denominado paraguas de micropilotes. En la figura 97 se observa tanto en vista frontal como lateral como son distribuidos y orientados con el fin de generar una correcta estabilización del suelo.

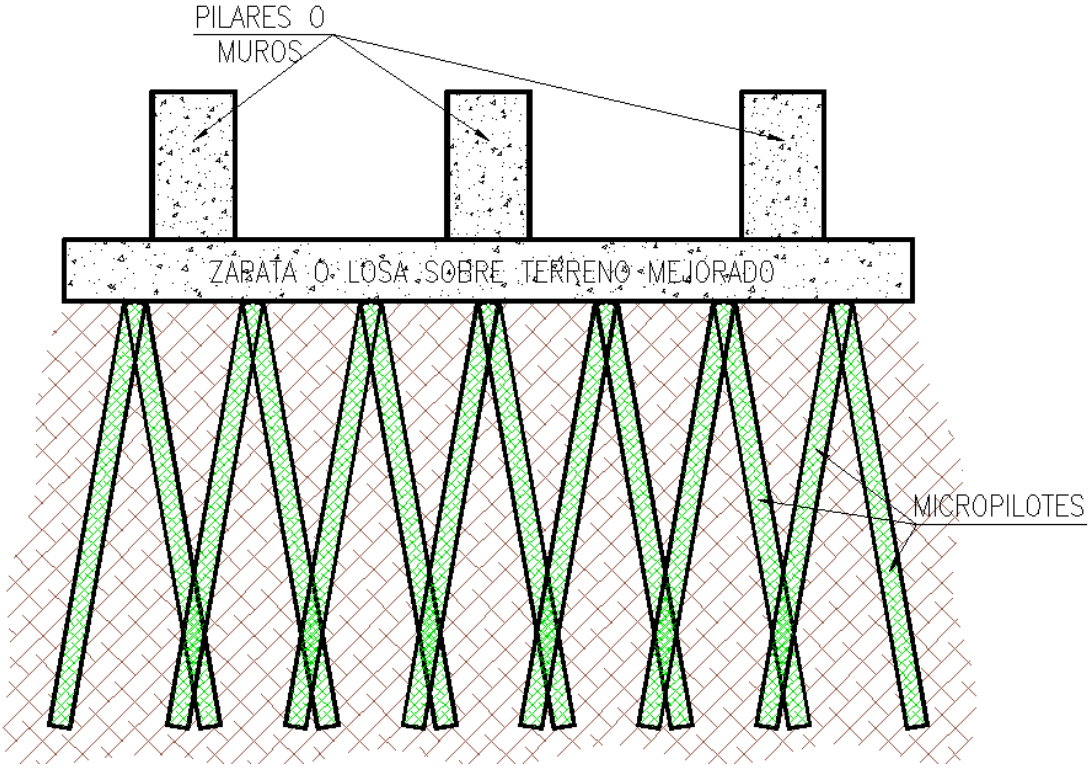
Figura 97. Aplicación de los micropilotes en la estabilización de las bocas de entrada a los túneles.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.132.

- ✓ Aumento de capacidad portante y control de asentamientos: Son usados cuando se requiere de grandes profundidades para obtener capacidades portantes deseadas y junto a ello se logra un control de asentamientos. En la figura 98 se observa el uso de micropilotes en cimentaciones con el fin de obtener una capacidad portante que permita la construcción de estructuras en sitios donde los suelos son de malas características o donde la estructura presenta una carga de servicio tan alta que no puede ser soportada con una cimentación superficial.

Figura 98. Aplicación de los micropilotes usados como mejoras de suelos en las cimentaciones.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.132

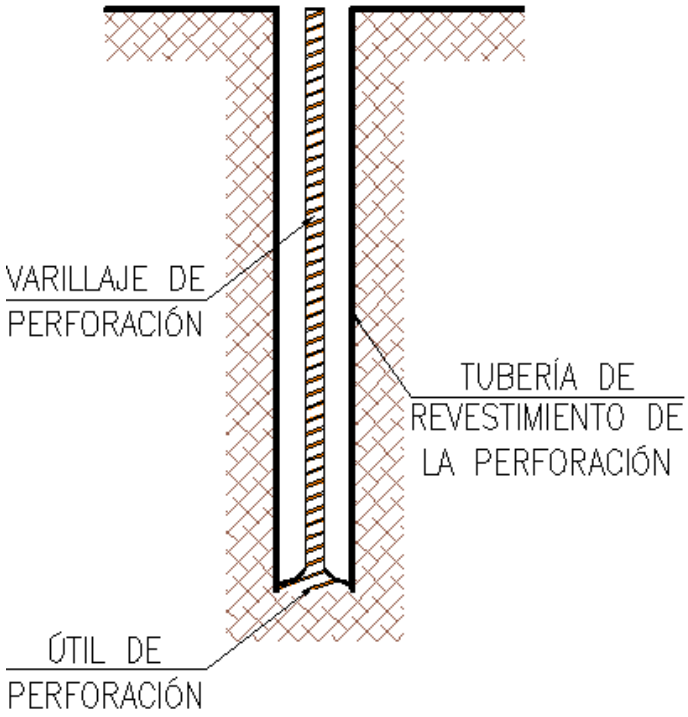
PROCESO CONSTRUCTIVO

A continuación, se dará una breve descripción sobre el proceso usado en la ejecución de un micropilote.

- ✓ Perforación: Este proceso puede variar según el tipo de terreno sobre el cual se va a realizar la perforación, ya que pueden usarse máquinas de rotación, rotopercusión e incluso con ayuda de hélices cuando los terrenos son muy

inestables. Adicionalmente dependiendo de la estabilidad del terreno se puede realizar en seco, con ayuda de lodos bentoníticos e inclusive con agua[22]. En la figura 99 se observa el proceso de perforación de los micropilotes con la ayuda de la tubería de revestimiento.

Figura 99. Proceso de perforación de los micropilotes con la ayuda de la tubería de perforación.

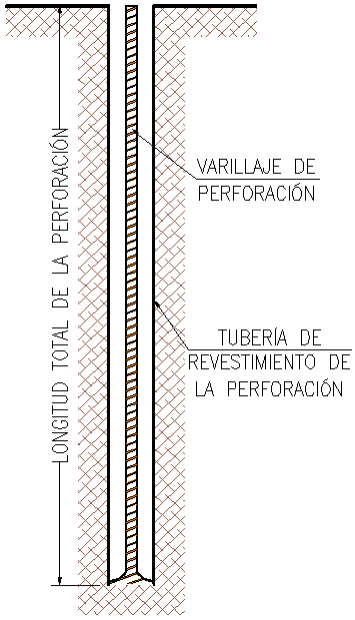


FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.134.

- ✓ Perforación total de micropilote y limpieza: El proceso de perforación es realizado hasta obtener la longitud total del micropilote. Posterior a este proceso se hace necesario obtener una superficie idónea para la correcta colocación del acero de refuerzo, por esto se debe realizar una limpieza a la perforación ya sea con agua o con aire a presión. En la figura 100 se observa la longitud total del micropilote con la ayuda de la tubería de perforación y de revestimiento.

[22] ROS ESTEBAN A. Op. cit., p. 36.

Figura 100. Perforación del micropilote con la ayuda de la tubería de perforación y de revestimiento.

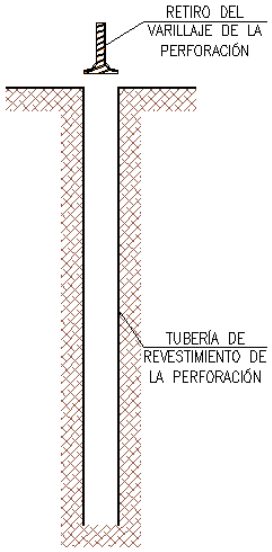


FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.134.

- ✓ Instalación de la armadura: el refuerzo usado para la construcción de un micropilote puede ser por medio de barras o tubos de acero. En el caso de usarse tubos de acero no hay necesidad del encamisado o tubería de revestimiento ya que estos sirven en el proceso de entubación como guía para la inyección. La principal función que tiene la armadura en los micropilotes es la de garantizar la continuidad del elemento y evitar que falle el mortero o lechada ante solicitaciones de tracción o flexión[23], adicionalmente se deberán colocar centradores que permitan un recubrimiento mínimo entre el suelo y el acero de refuerzo. En la figura 101 se observa el retiro de la tubería de perforación para posteriormente instalar el acero de refuerzo del micropilote.

[23] Ibíd., p. 38.

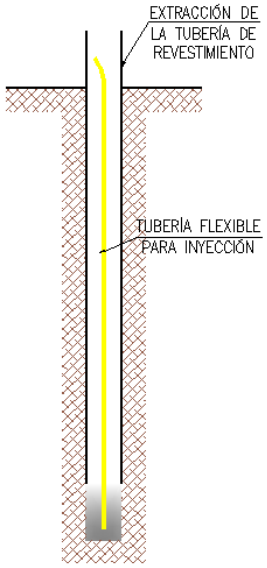
Figura 101. Retiro de la tubería de perforación e instalación del refuerzo del micropilote.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.134.

- ✓ Extracción de la tubería de perforación: después de instalada la armadura se debe realizar el retiro del encamisado o tubería de perforación con el fin de evitar que esta quede embebida en el suelo. En este proceso se debe tener un especial cuidado con el fin de evitar derrumbes dentro de la perforación. En la figura 102 se observa el proceso de extracción de la tubería de revestimiento y conjuntamente la inyección de la lechada o mortero.

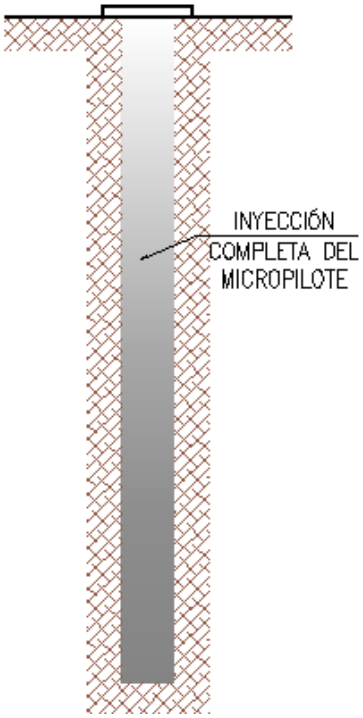
Figura 102. Extracción de la tubería de perforación.



- ✓ FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.134.

- ✓ Inyección del micropilote: en este proceso se debe garantizar un correcto llenado con el fin de generar una buena fricción entre el terreno y el acero de refuerzo del micropilote. Sin embargo, en suelos no cohesivos o en suelos blandos es común que ocurran pequeños derrumbes con lo que se dificulta garantizar un correcto llenado de estos elementos. Si a esto se le adiciona el uso de mortero para el llenado se dificulta aún más este proceso, ya que existe mayor probabilidad de no garantizar una correcta homogeneidad durante este proceso. Es por esto que se recomienda el uso de lechada debido a que presenta una mayor fluidez durante el proceso de inyección. En la figura 103 se observa el proceso de inyección de un micropilote.

Figura 103. Proceso de inyección de un micropilote.



FUENTE: MINISTERIO DE FOMENTO**.** Guia para el proyecto y la ejecucion de micropilotes en obras de carretera. España, 2005. p.134.

- ✓ Reinyección: este proceso es realizado cuando así lo amerite el diseño o cuando se tengan dudas sobre la primera fase de inyección. La principal función de este proceso es aumentar la capacidad de fricción entre el micropilote y el suelo.

ESTADOS LÍMITES EN MICROPILOTES

Como en cualquier estructura el diseño de los micropilotes requiere de una información previa que debe ser obtenida en campo y que depende específicamente del terreno sobre el cual se va a ejecutar la estabilización. Adicionalmente, se debe tener conocimiento sobre características del proyecto que se desea ejecutar.

Dentro de los estados límites que se deben realizar en las comprobaciones se encuentran cuatro estados límites últimos, los estados límites de servicio y algunas comprobaciones adicionales.

A continuación, se dará una breve descripción de los estados límites últimos que deben ser chequeados en la estabilidad de taludes, los cuales dan lugar a comprobaciones para determinar la estabilidad del suelo después de ser intervenido por los micropilotes.

- ✓ Verificación por estabilidad global: Esta comprobación se basa en suponer varias líneas de rotura que generen una inestabilidad general de la excavación.

- ✓ Verificación por capacidad portante del suelo: Esta comprobación consiste en evitar fallas consecuencia de la falta de resistencia del terreno.

- ✓ Verificación por falla estructural: Este estado límite consiste en la verificación tanto de los micropilotes como de la unión entre la viga corona y estos elementos. El fallo en los micropilotes se presenta cuando la resistencia del micropilote es inferior a los esfuerzos que se le transmiten y el fallo por conexión ocurre cuando los esfuerzos transmitidos superan la resistencia de la conexión entre el micropilote y la viga de corona.

Otro de los estados límites que deben ser chequeados en este tipo de estructuras son los de servicio, que al presentarse pueden llegar a generar fallas o deformaciones excesivas sin que esto implique un colapso global de la estructura.

ANCLAJES PASIVOS.

A continuación, se dará una breve definición de los anclajes pasivos, es importante tener en cuenta que el proceso constructivo de los anclajes pasivos y los micropilotes es similar, debido a que en ambos se realiza un proceso de perforación y de inyección. Sin embargo, una de sus principales diferencias es la inclinación con que se realizan las perforaciones, por un lado, los micropilotes tienden a tener una perforación en dirección vertical, mientras que en los anclajes pasivos su perforación generalmente es en dirección normal al talud.

INTRODUCCIÓN

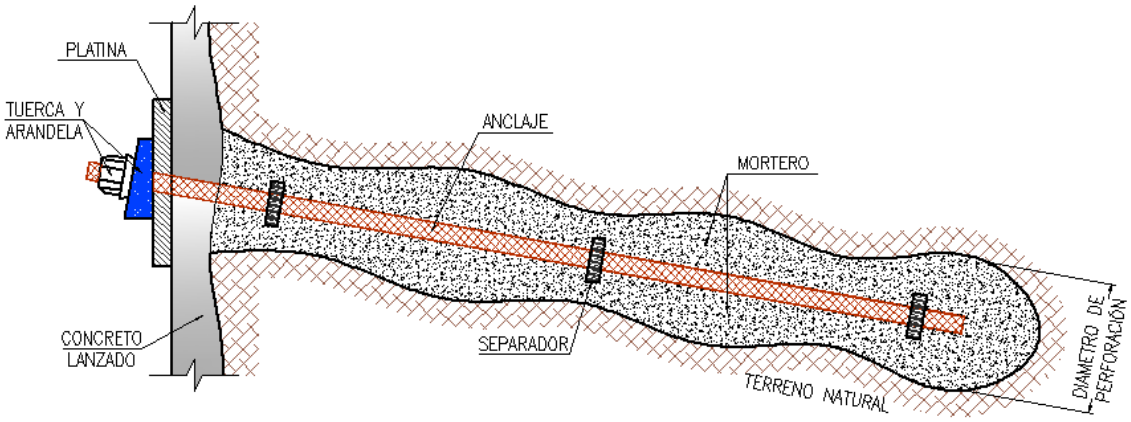
Los anclajes tal como se mencionó anteriormente son usados para la estabilización y el mejoramiento de terrenos, cuyo principal objetivo es transmitir una carga de tensión superficial a una zona profunda con la ayuda de tirantes (anclajes) para así lograr estabilizar la excavación o talud.

Los anclajes pasivos o pernos se construyen generalmente con barra roscada o corrugada en profundidades inferiores a 12m y llenados con lechada a baja presión o en ocasiones incluso a gravedad. Estos anclajes al igual que los micropilotes no presentan proceso de tensionamiento[24].

Esta tipología fue originada aproximadamente en los años 1970 y es aplicada en la gran mayoría de países sin que sea Colombia una excepción[25]. En la figura 104 se observan las principales partes que conforman los anclajes pasivos en los procesos de estabilización de taludes.

[24] SUAREZ, J. Estructuras ancladas pretensadas. Deslizamientos: Técnicas de remediación. Capítulo 4. p. 40.
[25] AGUDELO ZAPATA; BOIXADER CAMBRONERO. Op. cit. p. 3.

Figura 104. Partes de los anclajes pasivos.



FUENTE: Cálculo de soil nail walls o muros anclados con hormigón proyectado. [En línea]. (Recuperado en 26 de marzo 2017). Disponible en http://estructurando.net/2013/11/26/calculo-de-soil-nail-walls-o-muros-anclados-con-hormigon-proyectado/

Referente a la geometría de los anclajes pasivos o pernos su longitud depende del macizo a estabilizar, además el diámetro de la perforación y de la varilla a usar varían según su diseño. Además, se debe tener en cuenta el tipo de mezcla a usar con el fin de permitir una correcta unión entre el perno y el macizo de la roca, ya sea el uso de mortero o lechada en dosificaciones correctas.

Los anclajes pasivos tienen como función principal estabilizar excavaciones o taludes y su trabajo inicia cuando hay movimientos del terreno o de la estructura[26]. La mejor forma de explicar cómo funcionan estos anclajes es en el proceso de excavación que se origina en la construcción de estructuras, ya que al intervenir el suelo este sufre un proceso de relajación y por ende tiende a tener desplazamientos laterales lo que altera las propiedades del suelo hasta el punto de ocasionar inestabilidad o derrumbes. Sin embargo, antes de que esto ocurra inicia un proceso de activación de los anclajes pasivos ya que al tener un punto de fijación en una zona donde no se presentan desplazamientos se genera un tensionamiento de los anclajes cuya función es contener el movimiento del terreno y evitar derrumbes con la ayuda de pantallas o concreto lanzado a nivel superficial del terreno[27].

[26] RICO ALBARRACIN, J. Elaboración de un manual para la estabilización de taludes por medio de pantallas ancladas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2012. p. 45.
[27] MURILLO; ORTUÑO; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Op. cit. p. 20.

En la construcción de los anclajes pasivos se recomienda que no sean realizados con pantallas sino con la ayuda de concreto lanzado debido al peso que generan las pantallas. El concreto lanzado consiste en generar una capa de 10 a 12 centímetros de espesor de concreto sobre el talud expuesto y con ello una serie de anclajes denominados pernos con un área de influencia propia de 1 a 4 metros cuadrados[28].

Los pernos son elementos conformados principalmente por varillas corrugadas de acero y tuercas, ubicadas dentro de una perforación previa al terreno que posteriormente se le es inyectado el mortero o lechada para así generar fricción entre el perno y el suelo[29]. La idea en este tipo de construcción es generar un reforzamiento al macizo de roca por intermedio de los pernos ubicados durante el proceso de perforación.

La principal idea en la construcción de los anclajes pasivos es la de realizar su construcción a medida que se va realizando el proceso de excavación, con el fin de evitar que exista desprendimiento o relajación de la roca, ya que posterior a que exista la relajación del suelo y no se hayan instalado los anclajes pasivos no es conveniente la estabilización del talud por medio de este método[30].

Dentro de las principales ventajas que presenta este procedimiento se encuentra la facilidad y la velocidad de instalación de los pernos. Sin embargo, dentro de las principales desventajas se encuentra la limitante en capacidad de cargas, ya que puede estar en el orden de las 40 Ton[31].

APLICACIONES DE LOS ANCLAJES PASIVOS

A diferencia de los micropilotes que presentan una gran cantidad de aplicaciones ya que pueden ser usados como reforzamientos y ayuda en las cimentaciones, los anclajes pasivos tienen como aplicación principal servir de estabilización de taludes o excavaciones con el fin de lograr su estabilización.

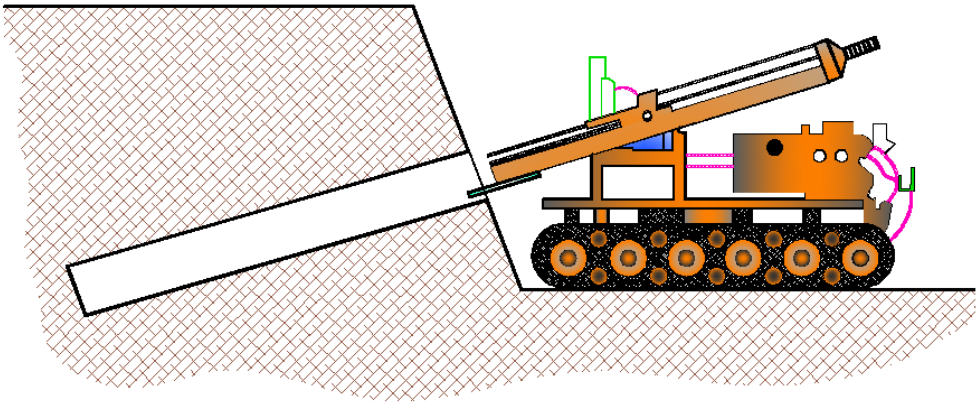
PROCESO CONSTRUCTIVO

A continuación, se dará una breve descripción sobre el proceso usado en la ejecución de un anclaje pasivo:

[28] AGUDELO ZAPATA; BOIXADER CAMBRONERO. Op. cit. p. 3.
[29] RICO ALBARRACIN. Op. cit. p. 47.
[30] CABALLERO OLARTE. Op. cit. p. 4.
[31] Ibín, p. 5.

- ✓ Perforación: este proceso es similar al usado en los micropilotes ya que depende principalmente de dos factores, el diámetro del anclaje dado en el diseño y adicionalmente el tipo suelo que se pretenda perforar para la ubicación del mismo. En la figura 105 se observa el proceso de perforación de los anclajes pasivos.

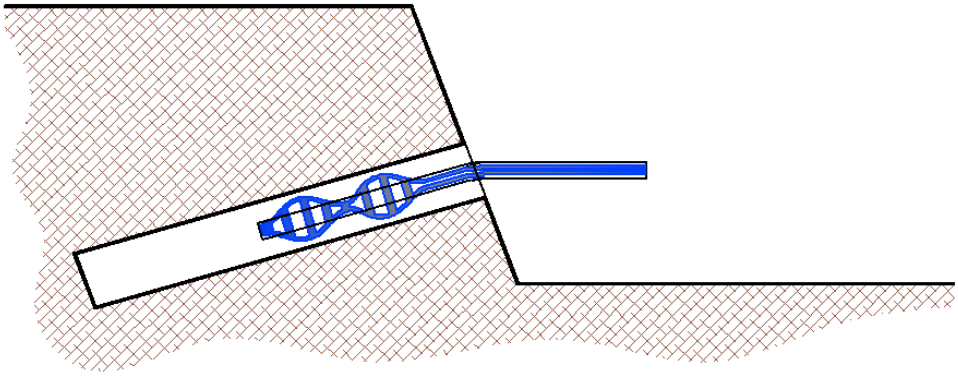
Figura 105. Proceso de perforación de los anclajes pasivos.



FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010, p.11.

- ✓ Instalación del anclaje pasivo: Posterior al proceso de perforación se introduce el anclaje que generalmente corresponde a una varilla corrugada con un gancho a 90 grados en la parte superficial que tiene como objetivo abrazar la malla de acero de refuerzo que se extiende en el talud. En ocasiones se usan varillas roscadas que con la ayuda de una platina y tuerca sirven para controlar los deslizamientos del talud ya que la barra se encuentra fija a una profundidad determinada. En la figura 106 se observa la instalación del acero de refuerzo en los anclajes pasivos.

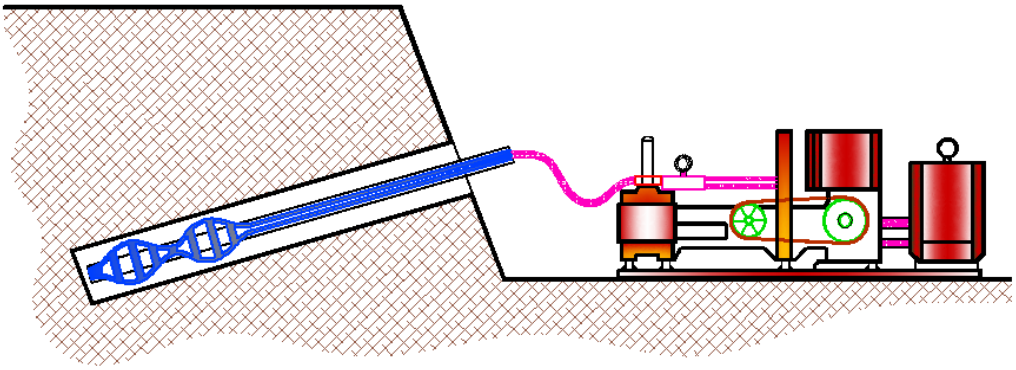
Figura 106. Instalación del acero de refuerzo en los anclajes pasivos.



FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 11.

- ✓ Inyección del anclaje: Este proceso es realizado por medio de una máquina que trabaja a presión o en ocasiones su llenado puede ser realizado a gravedad. Es importante recalcar que en el caso de llenar estos elementos a gravedad se puede presentar una mayor afectación por corrosión ya que es difícil garantizar una homogeneidad en su llenado. En la figura 107 se observa el proceso de inyección de los anclajes pasivos.

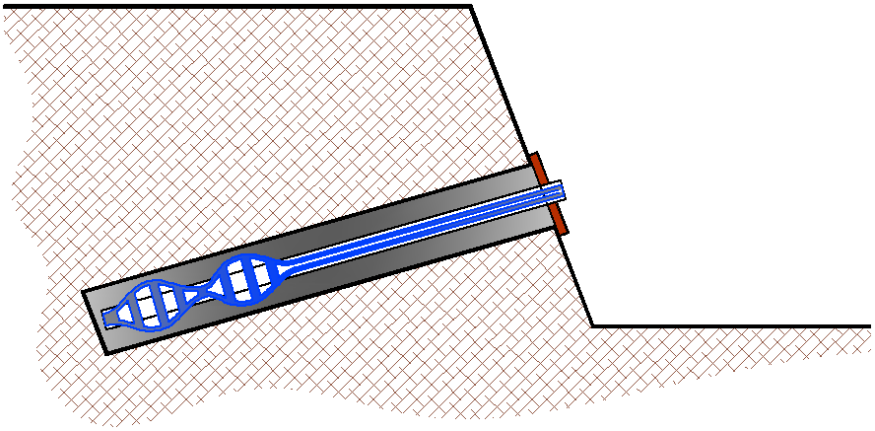
Figura 107. Proceso de inyección de los anclajes pasivos.



FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 11.

Finalmente se realiza el proceso de fijación a nivel superficial del talud con la ayuda del concreto lanzado aplicado al terreno y con el sistema de fijación enunciado anteriormente (ya sea con platinas y tuercas o con el acero de refuerzo con gancho a 90 grados en el extremo superficial). En la figura 108 se observa el proceso de fijación del anclaje pasivo con la ayuda de una platina y tuerca.

Figura 108. Proceso de fijación del anclaje pasivo con la ayuda de platina y tuerca.



FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 11.

ANCLAJES ACTIVOS

Los anclajes activos es un sistema de contención usado en excavaciones o taludes que a diferencia de los anclajes pasivos estos requieren un proceso de tensionamiento. A continuación, se dará una descripción de los anclajes activos que consta de introducción, aplicaciones y proceso constructivo.

INTRODUCCIÓN

El anclaje activo es un tipo de estructura usado para la estabilización de terrenos en zonas donde se requiere hacer excavaciones y se colinde con estructuras existentes. Estos anclajes son de gran uso y su función a diferencia de los anclajes pasivos inicia desde el momento de tensionamiento, por lo que no se debe esperar a que existan desplazamientos del suelo para que estos se activen. Por tal razón se asegura la estabilización y se evita en un mayor porcentaje los asentamientos en estructuras cercanas[32].

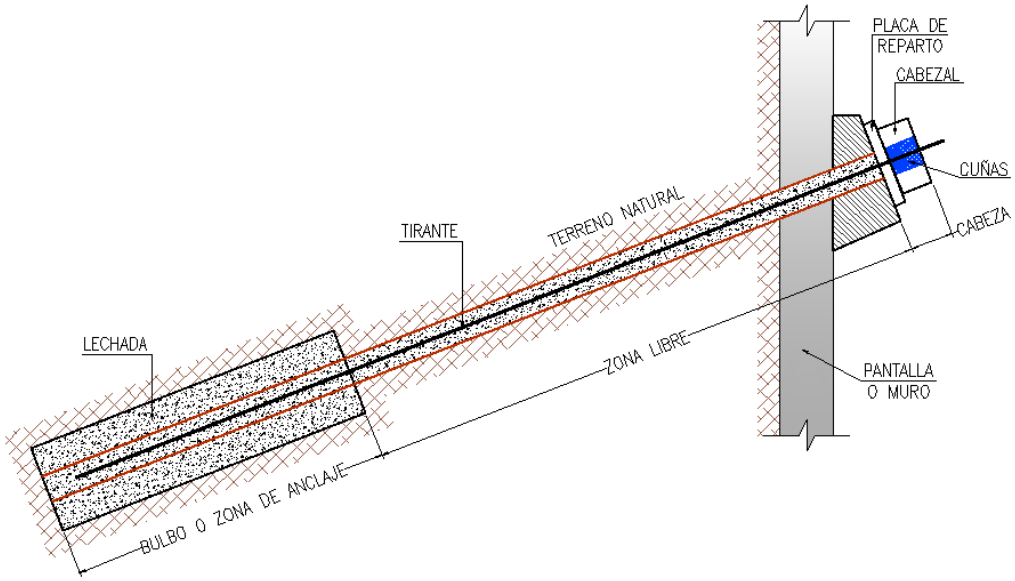
Este método de estabilización consiste en la construcción de anclajes dentro del terreno, los cuales tienen como función generar tensiones al suelo y a su vez permitir la estabilidad de la excavación o talud. Las tensiones son producidas debido a que en la parte superficial del talud existe una contención denominada pantalla cuyo objetivo es trasmitir las fuerzas al ancla y esta transmitirlas al bulbo[33].

[32] GEOFORTIS, SOLUCIONES GEOTECNICAS CONFIABLES**.** Procedimiento constructivo: muro anclado. Alajuela, Costa Rica. p. 24.
[33] Ibín., p. 25.

La longitud de los anclajes depende de varios factores como pueden ser las características del suelo, entre ellas estratigrafía, geología y otras que no dependen del suelo sino de las solicitudes de carga producto de las estructuras que colinden con estos elementos. Normalmente estos anclajes pueden llegar a tensionamientos de 30 a 60 toneladas.

En la figura 109 se observan las principales partes de los anclajes activos donde se pueden apreciar las tres principales zonas que lo conforman: zona de anclaje, zona libre y cabezal.

Figura 109. Partes del anclaje activo.



FUENTE: DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS. Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera
. Madrid, Enero 2001, p.10.

Es importante tener en cuenta que el bulbo conformado en este sistema debe estar ubicado por detrás de la superficie de falla del terreno con el fin de evitar que al momento de haber una inestabilidad falle todo el conjunto[34].

Durante el proceso de diseño es importante tener en cuenta los factores de seguridad que están relacionados tanto en la superficie de falla crítica generada

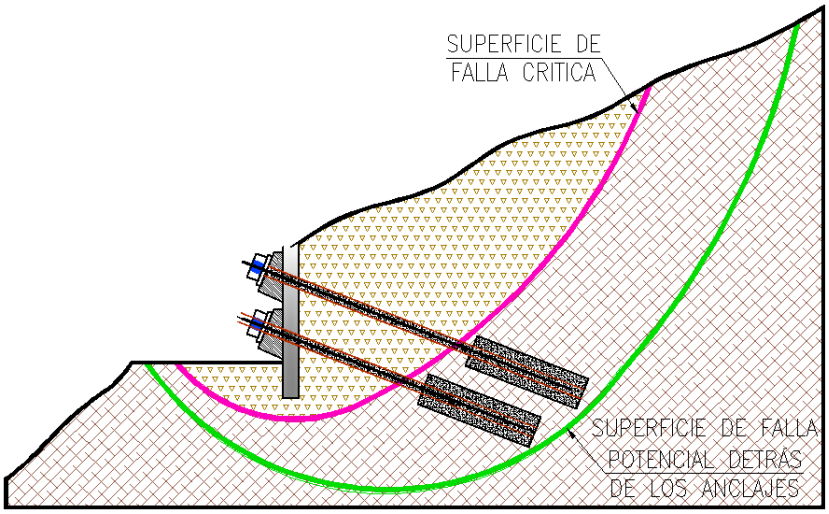
[34] CABALLERO OLARTE. Op. cit. p. 4.

antes del anclaje como en la superficie de falla potencial ubicada por detrás del sistema de anclas (Weatherby Y Nicholson, 1982)[35].

Dentro de las recomendaciones halladas en la construcción y diseño de los anclajes activos se encuentra una longitud mínima de 9 metros con el fin de lograr una adherencia suficiente entre el suelo y el anclaje. Adicionalmente, controlando esta longitud se tiene mayor probabilidad que el bulbo se encuentre por detrás de la superficie de falla (Sabatini, 1999)[36].

A continuación, se observa en la figura 110 la superficie de falla crítica y la superficie de falla potencial que se puede presentar en un talud.

Figura 110. Superficie de falla crítica y la superficie de falla potencial en un talud.



FUENTE: SUAREZ, J. Deslizamiento. Analisis geotecnico. Volumen I editorial UIS escuela de filosofia. 2009. p. 71.

Como ya se mencionó, una de las partes que conforman los anclajes activos es el bulbo, el cual tiene como función generar una zona cementada sobre el final del ancla con el fin de trasmitir la carga de tensión al suelo. Generalmente estos bulbos son de longitudes mayores a 3 metros[37].

Es importante saber que la distribución de esfuerzos a lo largo del bulbo no es uniforme ya que existe una mayor concentración en la parte final, sin embargo, a la

[35] Ibín., p. 5.
[36] Ibín,. p. 6.
[37] RICO ALBARRACIN. Op. cit. p. 23.

hora de realizar el diseño se debe considerar que los esfuerzos son iguales durante toda su longitud[38].

Para conocer la longitud necesaria del bulbo existen dos aspectos principales, por un lado, la carga que va a soportar y además las propiedades de resistencia al corte del suelo donde se va a construir. En suelos sueltos o blandos las longitudes del bulbo de anclaje son mayores[39].

Con el fin de determinar si un terreno es óptimo para la construcción de pantallas con anclajes activos se deben revisar varios factores de diseño, sin embargo, existen unas pautas preliminares que limitan la construcción de bulbos de anclajes en ciertos suelos. Por ejemplo, en rocas y suelos granulares (arenosos) se ha obtenido un buen comportamiento de este tipo de estructuras, sin embargo, en otros tipos de suelos como son los arcillosos o suelos orgánicos frecuentemente se tienen problemas de capacidad[40].

Dentro de las recomendaciones encontradas en la construcción de los anclajes activos se encuentra la no presencia de traslapos en la zona de bulbo con el fin de evitar fallas en el elemento. Adicionalmente los tirantes usados en esta zona deben ser cables o en ocasiones barras corrugadas, evitando así el uso de barras lisas ya que se deberían usar dispositivos especiales.

Para el proceso de inyección del bulbo, se recomienda el uso de lechada con dosificaciones de agua-cemento entre 0,4 y 0,6. No se recomienda el uso de arena en este tipo de mezclas ya que puede afectar la manejabilidad a la hora de realizar la inyección. El agua usada en las lechadas deberá estar limpia y no puede contener sustancias dañinas para el cemento o anclaje como son los cloruros, aceites, sales, álcalis o materiales orgánicos[41].

HISTORIA

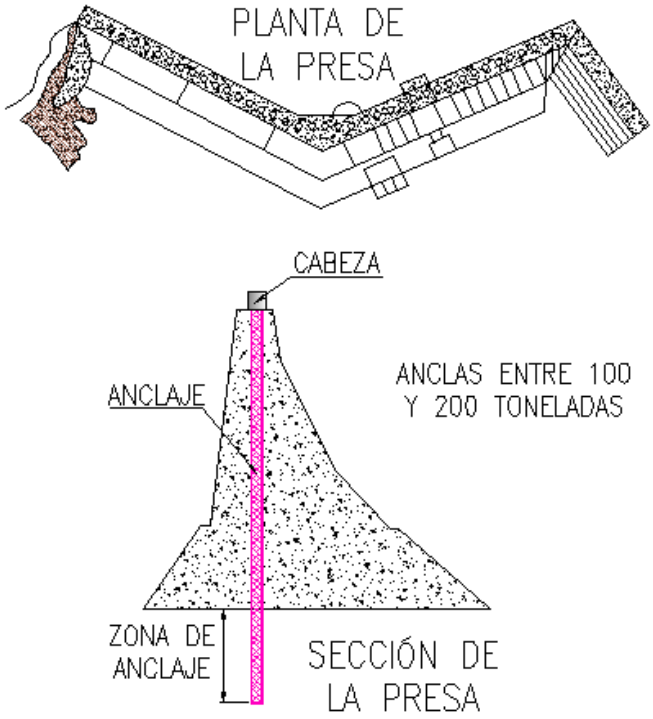
La primera vez que se tiene registro sobre el uso de los anclajes activos fue en el año de 1930 realizado por el ingeniero Francés Coyne en 1930 (Juran, 1982), la estructura fue el faro La Jeumont ubicado en la costa Noroeste de Francia. Cuatro años más tarde en 1934 se realizó la primera estabilización de un terreno por medio

[38] CABALLERO OLARTE. Op. cit. p. 6.
[39] RICO ALBARRACIN. Op. cit. p. 27.
[40] CABALLERO OLARTE. Op. cit. p. 7.
[41] INSTITUTO NACIONAL DE VIAS**.** Anclajes. Artículo 623-07

de anclas pretensadas en la presa Cheurfas en Argelia (Mohammed Et Al, 1969) estos anclajes fueron usados para generar estabilidad evitando el vuelco de la estructura.

En la figura 111 se observa la planta y sección de la presa junto con la ubicación del anclaje y la sección típica.

Figura 111. Primer anclaje pretensado en presa Cheurfas en Argelia.

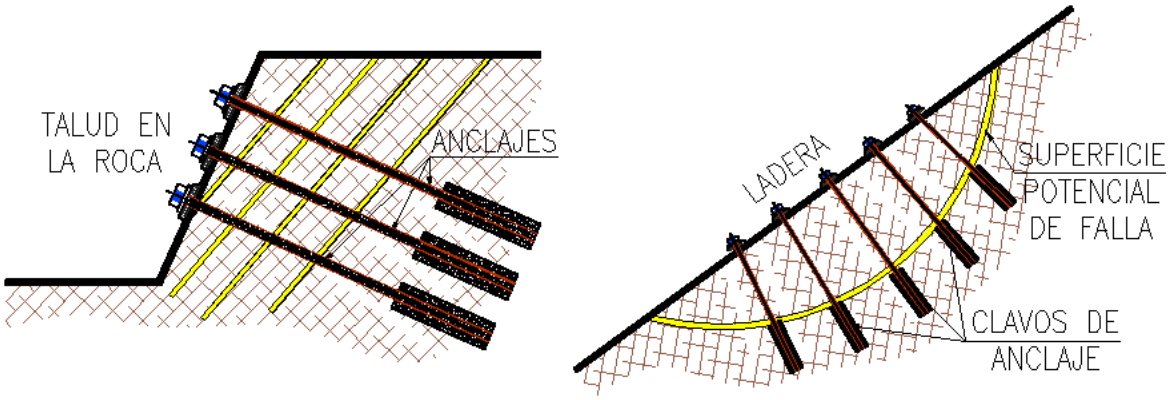


FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.3.

APLICACIONES

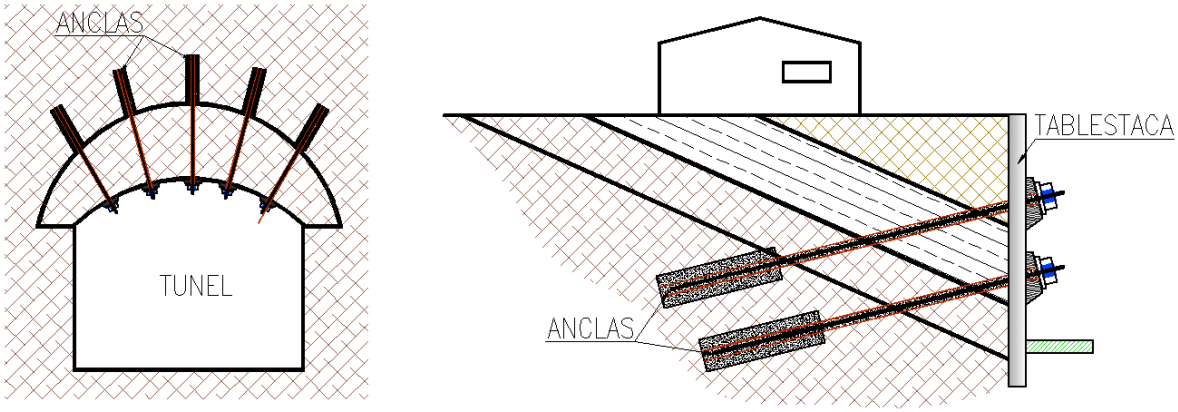
Existen diversos usos para los anclajes activos como es la contención de taludes en suelo y roca (figura 112), contención de las bocas de entradas a los túneles y estabilización de excavaciones con estructuras aledañas (figura 113), construcción de diques y de presas con el fin de controlar las supresiones hidráulicas y sujetar estructuras con el fin de controlar fuerzas de volteo y deslizamiento (figura 114), estabilización de estructuras altas como torre de transmisión y generación de fuerzas de transmisión para marcos de carga (figura 115).

Figura 112. Aplicación de los anclajes activos en la estabilización de taludes.



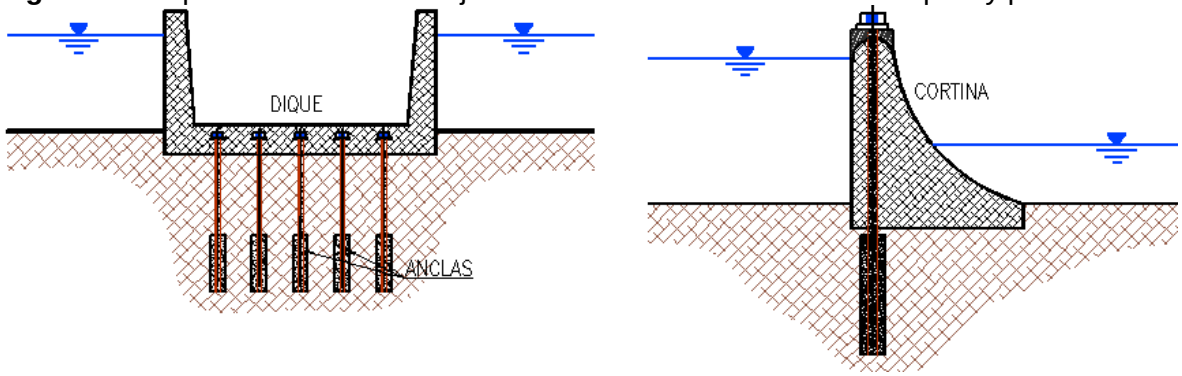
FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.5.

Figura 113. Aplicación de los anclajes activos en túneles y excavaciones.



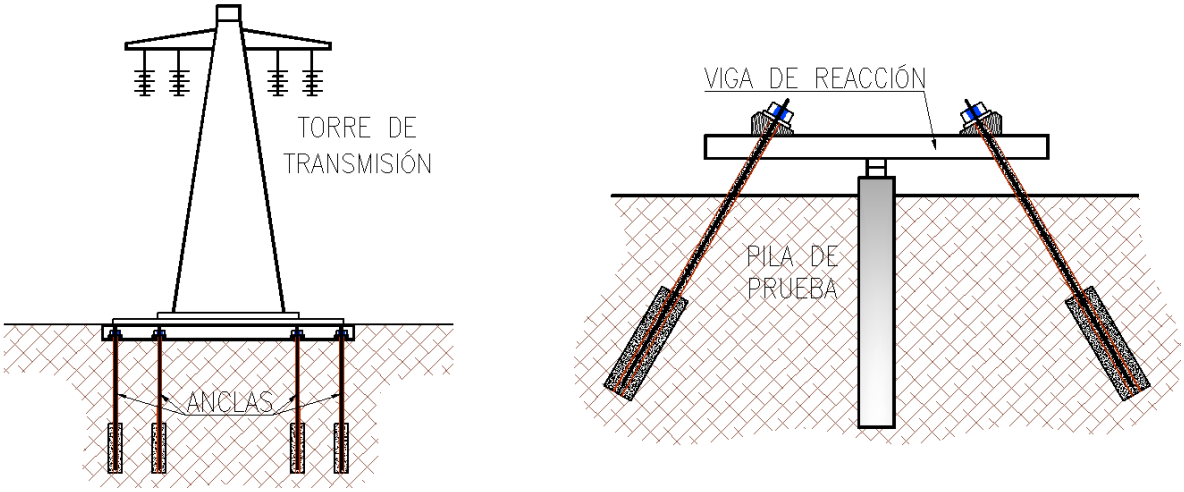
FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.5.

Figura 114. Aplicación de los anclajes activos en la construcción de diques y presas.



FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.5.

Figura 115. Aplicación de los anclajes activos para la estabilización de cimientos.



FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.5.

Es importante recalcar que este proyecto va orientado a anclas usadas en la estabilización de terrenos cuando se realizan excavaciones para la construcción de edificios.

DISPOSITIVOS AUXILIARES PARA ANCLAJES ACTIVOS

Existen dispositivos auxiliares en la construcción de anclajes activos necesarios para garantizar un correcto funcionamiento. Dentro de estos elementos se encuentran[42]:

- ✓ Funda de protección: es un tubo de PVC liso donde se encuentran los cables para realizar el tensionamiento, el espacio libre que queda dentro del tubo es usado para colocar material anticorrosivo ya sea lechada o grasa con el fin de evitar que la longitud libre del ancla presente corrosión.

- ✓ Tubo de inyección: este elemento presenta perforaciones en la zona de bulbo y tiene como función servir durante el proceso de inyección de la lechada. Las perforaciones que presenta el tubo de inyección son generalmente en cruz y tienen unos manguitos cuya función es elongarse durante el proceso de inyección.

[42] MONROY SALGADO, R. Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.5.

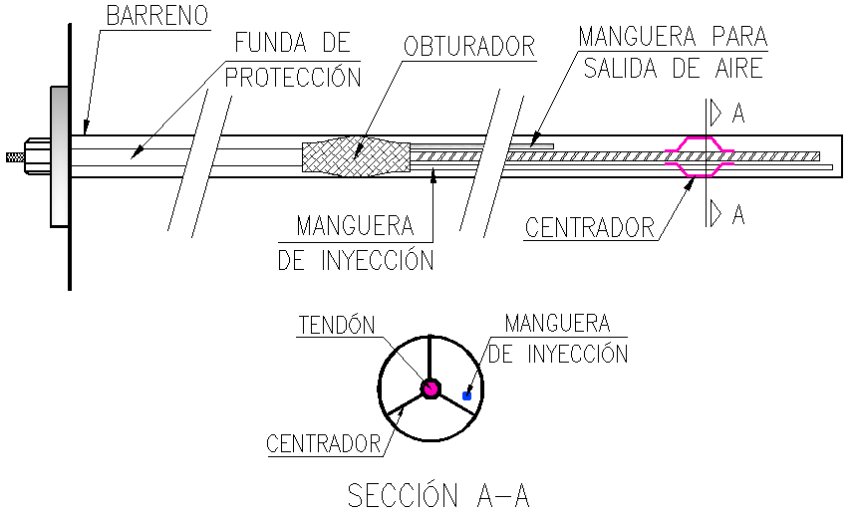
- ✓ Obturador: esta parte del ancla tiene como función aislar la longitud libre del anclaje de la zona de bulbo, con el fin de lograr un buen sello entre estas dos zonas.

- ✓ Separadores: sirve para dar un recubrimiento entre los cables y el terreno. Son ubicados tanto en la zona libre como en el bulbo.

- ✓ Centradores: sirven para dar un recubrimiento al tendón y además prevenir el pandeo del anclaje entre los puntos de contacto.

En la figura 116 se observan los dispositivos auxiliares utilizados en los anclajes activos.

Figura 116. Dispositivos auxiliares utilizados en los anclajes activos.



FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.17.

TIPOS DE FALLA

Existen varios mecanismos asociados a las fallas en los anclajes activos como es el exceso de carga en una de las anclas producto de un mal proceso de tensionamiento. Además, existen otros factores asociados a fuerzas ejercidas por el nivel freático, eventos sísmicos, entre otros[43].

Las principales fallas que se presentan en las pantallas activas son:

[43] CABALLERO OLARTE. Op. cit. p. 6.

- Falla del acero del tendón.
- Falla de la masa del suelo.
- Falla de la unión entre el bulbo y el suelo.
- Falla entre el tendón y la lechada.

PROCESO CONSTRUCTIVO

Antes de iniciar el proceso constructivo es de gran importancia recalcar la forma de almacenar y transportar los tirantes, ya que se deben conservar sin corrosión ni daños mecánicos. Adicionalmente no se deben doblar con radios menores a los indicados por el fabricante[44].

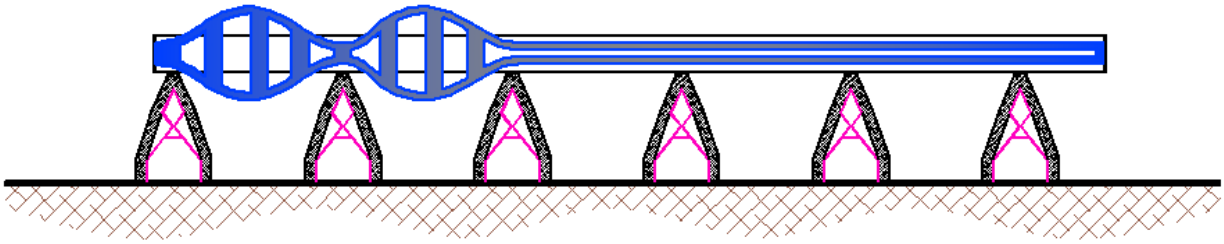
El almacenamiento de estos elementos es de gran importancia debido a que se deben usar materiales en óptimas condiciones[45]. En la figura 117 se observa la diferencia entre un cable que presenta óptimas condiciones y otro con un mal proceso de almacenamiento.

Figura 117. Comparación entre un almacenamiento correcto e incorrecto de los tirantes.

Antes de iniciar con los trabajos de perforación, se debe tener una superficie de trabajo. Para tal fin, son realizadas las denominadas trincheras para ir bajando secuencialmente la excavación durante la ejecución del proyecto. Seguidamente se inicia con el proceso de armado del anclaje que incluye colocación de la tubería PVC, separadores, guaya, manguitos y todas las demás partes correspondientes a este tipo de elementos. En la figura 118 se observa un esquema sobre el armado de los anclajes activos.

[44] DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS. Op. cit. p. 10.
[45] Ibíd., p. 10.

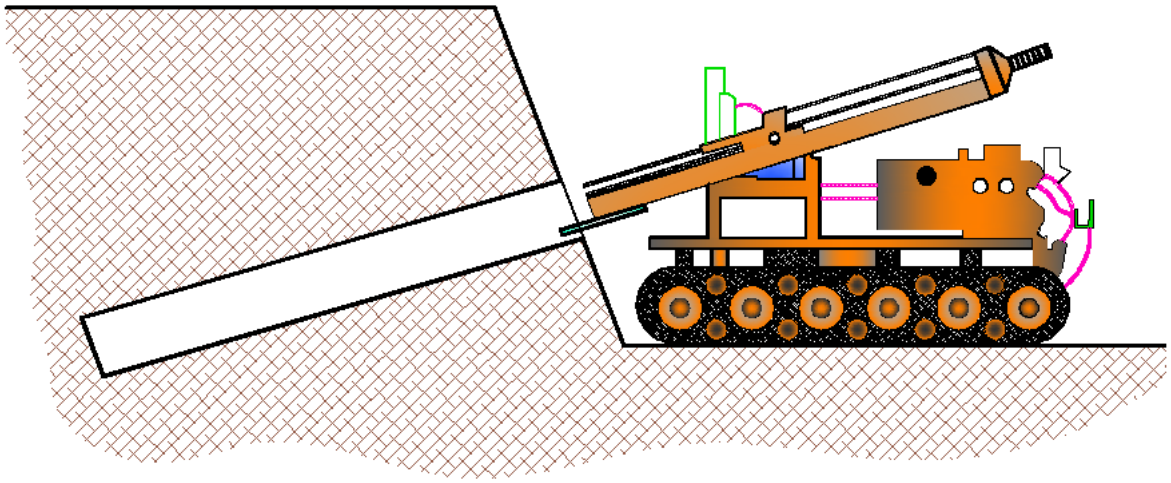
Figura 118. Esquema general del armado de los anclajes activos.



FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 12.

Posteriormente, se inicia con el proceso de perforación respetando las condiciones dadas en el diseño como es el diámetro, profundidades y ángulos de inclinación asociados con cada uno de los elementos[46]. Dentro de los diámetros convencionales usados en este tipo de perforación encuentran entre 3” y 6”. En la figura 119 se observa el proceso de perforación usado en los anclajes activos.

Figura 119. Proceso de perforación en los anclajes activos.



FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 12.

Es importante garantizar que durante el proceso de perforación se generen superficies rugosas a lo largo de toda el ancla, principalmente en la zona de bulbo; y así lograr fricción y por ende estabilización en el talud.

[46] DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS. Op. cit. p. 12.

Existe dos tipos de perforaciones que son las más usadas: perforación a rotación y perforación a rotopercusión.

En la perforación a rotación la tubería gira y hace presión al taladro hacia adentro para que vaya avanzando. La tubería usada en este tipo de perforación puede ser hueca o sólida. La tubería hueca es usada cuando se realiza la perforación con aire o agua.

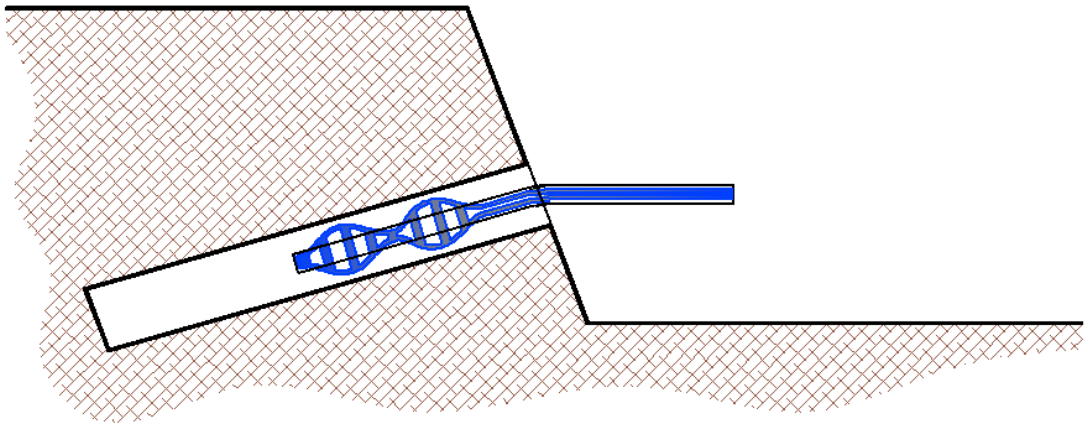
La otra forma de perforación es a rotopercusión usada en suelos muy duros o en rocas, en este tipo de perforación la tubería usada siempre es hueca con el fin de darle paso a la presión de aire y así lograr accionar el martillo. Estos martillos tienen en su punta una cabeza que golpea contra el suelo o roca lo cual genera un rompimiento del material y a su vez la rotación ayuda a fisurar el material.

En algunas ocasiones dependiendo del tipo de terreno es necesario limpiar la perforación con la ayuda de agua a presión ya que ocurren derrumbes internos durante su proceso de construcción[47].

Posteriormente se procede a realizar la instalación de los tirantes, los cuales deben ser ubicados tan pronto sea terminada la perforación, salvo algunas excepciones de inconvenientes en obra que retrasen su instalación, sin embargo, no podrán transcurrir más de 24 horas sin ingresar el anclaje[48]. En este proceso se debe tener especial cuidado de no dañar o deformar estos elementos. Adicionalmente se tendrá que revisar que no se encuentre alterado la protección a la corrosión de dichos tirantes. En la figura 120 se observa el proceso de instalación de los tirantes dentro de la perforación.

[47] FLORES RUGELES; HERNANDEZ JOYA. Op. cit. p. 27.
[48] Ibíd. p. 28.

Figura 120. Proceso de instalación de los tirantes en anclajes activos.



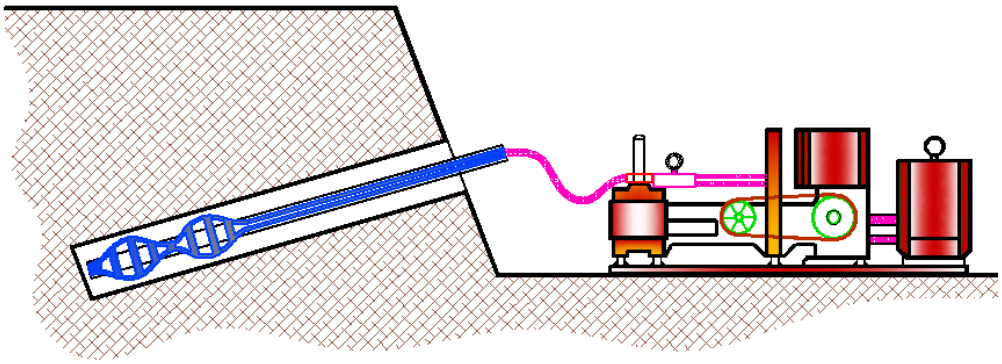
FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 12.

Durante el proceso de instalación de los tirantes se deberán colocar unos separadores con el fin de evitar que entren en contacto con el terreno y se genere corrosión en el elemento. Normalmente el distanciamiento entre estos separadores es de 1 metro en la zona de bulbo y 1,50 metros en la zona libre. En ningún caso se permite que la separación en la zona de bulbo sea mayor a dos metros y en la zona libre sea superior a los tres metros[49].

Después de ubicado el tirante dentro de la perforación se realiza el proceso de inyección en el menor tiempo posible con el fin de disminuir la probabilidad de derrumbes ya que si esto ocurre abran zonas del anclaje que quedarán sin lechada y consecuencia a esto generaran zonas débiles en el elemento[50]. Durante este proceso se debe generar la zona de bulbo y adicionalmente proteger el tirante de la corrosión en la zona libre. En la figura 121 se observa el proceso de inyección usado para la construcción de los anclajes activos.

[49] DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS. Op. cit. p.12.
[50] Ibíd,. p. 12.

Figura 121. Proceso de inyección en anclajes activos.

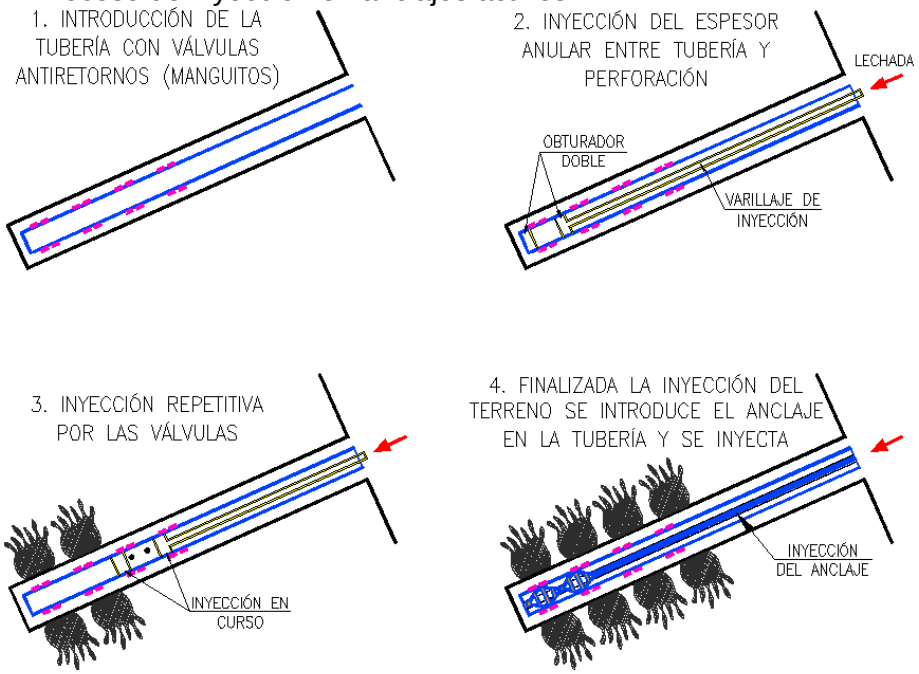


FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 12.

La inyección de la lechada (cemento portland y agua) es realizada por medio de una tubería y una flauta que llega hasta el fondo del anclaje e inicia el proceso de llenado metro a metro. Este proceso tiene una presión de aproximadamente 130 psi. Es importante aclarar que el llenado de estos elementos depende principalmente de la destreza del operador que se encuentra realizando la inyección. Generalmente se debe esperar a que la lechada rebose dicha perforación, sin embargo, debido a varios factores como son el tipo o condiciones del suelo (hormigueros) es factible que la lechada no llegue a rebosar.

En la figura 122 se observa el proceso de inyección utilizado para el correcto llenado de la lechada en los anclajes.

Figura 122. Proceso de inyección en anclajes activos.



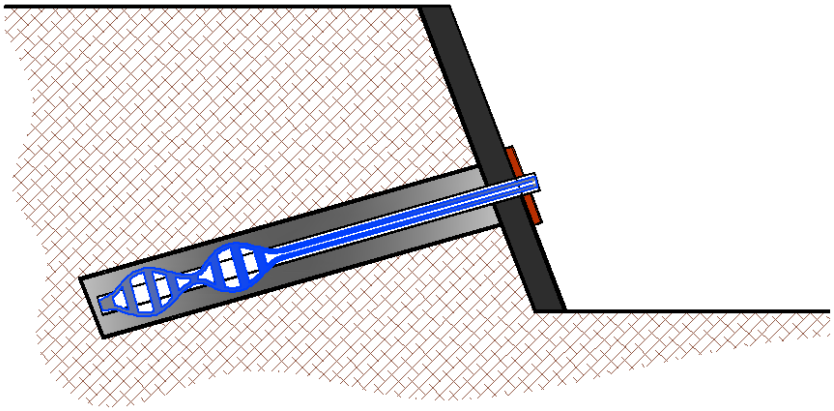
FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.8.

.

Simultáneamente al proceso de inyección se puede ir elaborando las pantallas que servirán de soporte para realizar el respectivo tensionamiento de los anclajes. Estos procesos deben ser realizados en la menor brevedad posible y teniendo en cuenta que el anclaje después de inyectado necesita de siete días aproximadamente para que alcance la resistencia suficiente a la carga de tensionamiento indicada en los diseños[51]. En la figura 123 se observa un anclaje activo y la pantalla de concreto a nivel superficial de la excavación.

[51] GEOFORTIS, SOLUCIONES GEOTECNICAS CONFIABLES. Op. cit. p. 26.

Figura 123. Anclaje activo y ubicación de pantalla de concreto.



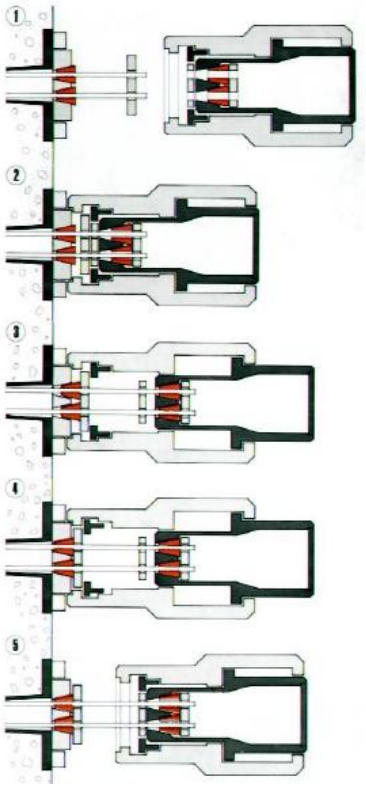
FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 12.

Posteriormente inicia el proceso de tensionamiento que por lo general es realizado siete días después de realizar la inyección al 100% de la carga o cinco días después de realizar la inyección al 50% de la carga.

En el proceso de tensionamiento se deben llevar una serie de pasos que consisten en la colocación de una placa de apoyo que contiene el gato y la introducción de cada uno de los cables al sistema (1), seguidamente los cables del anclaje deben ser sujetados por el gato mediante la ayuda de cuñas (2), como tercer paso después de estar sujetos los cables se deben tensionar hasta la carga precisa teniendo en cuenta el control de la presión que está ejerciendo el sistema hidráulico (3), posteriormente se empujan las cuñas de la cabeza del anclaje con el fin de dejarlas bloqueadas al nivel de tensionamiento deseado (4) y finalmente se libera el embolo o pistón del gato con el fin de soltar los cables y dejarlos a la carga de diseño requerida (5).

En la figura 124 se observa el esquema del procedimiento de tensionamiento de los anclajes descrito anteriormente.

Figura 124. Esquema del procedimiento de tensionamiento de los anclajes.



FUENTE: MURILLO, T; ORTUÑO, L; URIEL & ASOCIADOS, S.A. Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Madrid, España. Junio 2010. p. 14.

Es importante tener en cuenta que durante el proceso de diseño es preferible el uso de mayor cantidad de anclajes y generar menores cargas de tensionamiento con el fin de evitar fallas en los anclajes debido a desprendimientos de bulbos[52].

En el caso de no llegar a la carga deseada bien sea porque el anclaje falle antes o no cumpla con la curva de deformación vs carga se deberá realizar la reinyección las veces que se requiera hasta que cumpla con la carga de diseño. Se recomienda que el máximo de reinyecciones realizadas para un anclaje sea de tres. Si después de esta serie de reinyecciones no se alcanza la carga deseada significa que deben cambiar la longitud de diseño de los anclajes, ya que el suelo probablemente no será capaz de soportar la carga de tensionamiento bajo esas condiciones.
En las recomendaciones de tensionamiento se sugiere que los equipos de tensionamiento sean calibrados por lo menos una vez al año. Adicionalmente el tensionamiento debe efectuarse a todos los cables del tirante simultáneamente y no

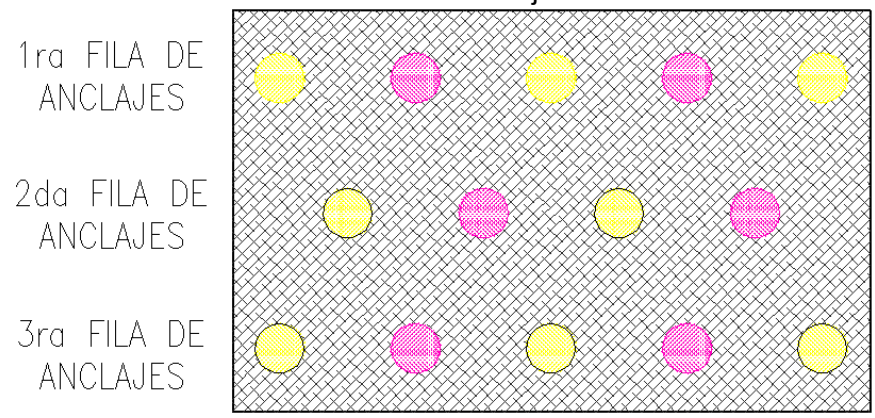
[52] FLORES RUGELES; HERNANDEZ JOYA. Op. Cit p. 126.

de forma individual, sin embargo, en muchas ocasiones se omite esta recomendación y el tensionamiento es realizado cable a cable y no de manera simultánea[53]. En la figura 125 se observan las dos tipologías de gatos, al costado izquierdo el que realiza el tensionamiento de forma simultánea a todos los torones y al costado derecho el que lo realiza cable a cable.

Figura 125. Tipologías de gatos al realizar tensionamiento.

En la figura 126 se observa un esquema sobre cómo debe ser realizado el proceso de tensionamiento. Como se puede apreciar el tensionamiento de los anclajes pasivos no debe ser realizado de forma lineal sino por el contrario de forma intercalada con el fin de no realizar esfuerzos concentrados en el suelo y por ende su probabilidad de falla.

Figura 126. Proceso de tensionamiento de los anclajes activos en función de su posición.



NOTA: LA FASE DE TENSIONAMIENTO DE LOS ANCLAJES SE REALIZA INTERCALANDO LOS ANCLAJES, ES DECIR, SE DEBEN TENSIONAR LOS ANCLAJES IDENTIFICADOS EN LA FIGURA DE COLOR AMARILLO Y POSTERIORMENTE LOS DE COLOR MORADO. ES IMPORTANTE ACLARAR QUE NO SE DEBE INICIAR LA SEGUNDA FILA SIN TENER EL 100% DE LOS ANCLAJES DE LA PRIMERA FILA TENSIONADOS.

[53] INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Op. Cit. p. Anclajes. Artículo 623-07

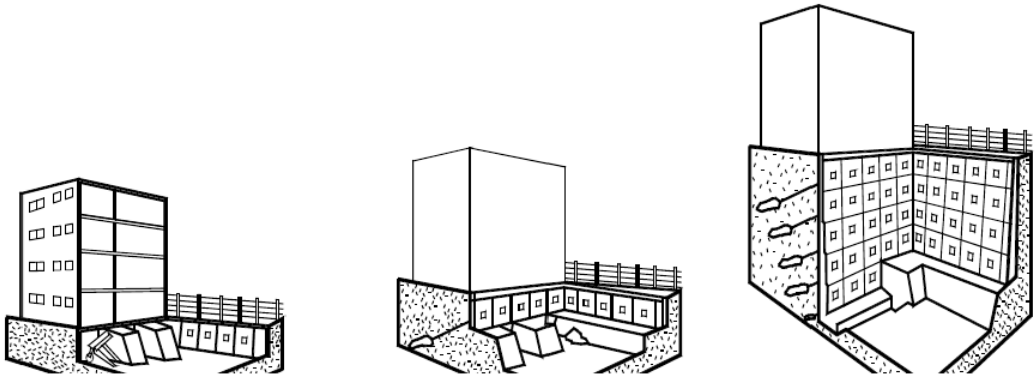
Finalmente se deberá proceder a realizar el corte de los cables sobrantes, el cual se deberá realizar con disco y en ningún caso está permitido el uso de soplete. Posteriormente, se colocan las respectivas cabezas que sirven como protección de los cables. Esta longitud sobresaliente de cable debe estar del orden de 5 centímetros en el caso que se esté seguro que la carga aplicada no va a variar ya que en el caso de requerirse el uso del gato para futuros tensionamientos o verificaciones de carga, se recomienda dejar 60 centímetros de longitud.

La verificación de carga es realizada con el fin de corroborar las propiedades y la resistencia de los anclajes ejecutados. Estos ensayos de carga son utilizados principalmente en tres aspectos como es en el ámbito experimental, con el fin de calibrar los procesos constructivos (en el caso del constructor), para la aceptación de trabajos en el caso que así se requiera ya sea por parte de interventoría o de documentos o de contrato y finalmente en el caso en que se tengan dudas para poder realizar la verificación de estos[54].

Es importante tener en cuenta que todos estos procesos son realizados a medida que se van haciendo las respectivas excavaciones en el terreno. Inicialmente se tiene el terreno donde se piensa realizar la estabilización por medio de anclajes y se van realizando los respectivos cortes de tal forma que se generen las denominadas trincheras con el fin de no desestabilizar el terreno de forma inmediata y de esta forma se van realizando los respectivos anclajes con su respectivo tensionamiento, después de estos son retiradas las trincheras intermedias para instalar y tensionar los anclajes de estas zonas. Finalmente, concluida la primera fila de anclajes se procede a realizar nuevamente un proceso de excavación con trincheras y se realiza el mismo proceso descrito anteriormente hasta lograr la profundidad requerida. En la figura 127 se observa el procedimiento de excavación y construcción de las pantallas ancladas.

[54] Ibín,. Anclajes. Artículo 623-07.

Figura 127. Proceso de excavación y construcción de pantallas ancladas.



FUENTE: MONROY SALGADO, R**.** Anclajes en suelos. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 2007. p.130.

Para el proceso de excavación las trincheras son recomendadas con un ancho no mayor de tres metros o más de dos anclas seguidas y un alto igual a lo que requiera el equipo de perforación de los anclajes, generalmente esta altura no sobrepasa los 2 metros.

Es por esto que surge la necesidad de estudiar los efectos que genera la maquinaria usada en la construcción de anclajes activos, debido a que esta puede incidir en el comportamiento del suelo ya que los procesos de perforación, llenado y tensionamiento (PIT) imprimen al suelo una energía que emite ondas lo cual genera que el terreno no se encuentre en su frecuencia natural y pueda alterar las estructuras aledañas a la obra.

ANEXO B. ENSAYOS GEOFÍSICOS

HISTORIA

Con el paso de los años la evolución que se ha observado en varias ramas de la ciencia ha sido muy significativa y ha permitido dar grandes pasos al hombre y evolucionar en aspectos que hace unos años era prácticamente imposible abordar.

Una de estas evoluciones se ha dado en el campo de la geofísica la cual ha permitido que el hombre bajo principios experimentales y el estudio de métodos físicos por medio de ondas sea capaz de comprender varios aspectos sobre el funcionamiento de la tierra.

Respecto a la evolución que ha tenido la geofísica se puede decir que su origen inicio con la creación de la brújula alrededor del año 1300, posteriormente ha tenido

una gran evolución en lo referente a nuevos avances, producto de la gran cantidad de descubrimientos que han tenido científicos teniendo así un mayor conocimiento. Uno de estos descubrimientos que ha permitido evolucionar y observar la ciencia desde un punto de vista diferente ha sido el descubrimiento de Galileo sobre la caída de los cuerpos en 1589[55].

Posteriormente en el año 1640 aparecieron herramientas como la brújula magnética que tiene como función la búsqueda de hierro. En el año 1684 es expuesta la ley de gravitación universal por Isaac Newton; y así, con el paso de los años se ha visto una gran evolución tanto en el ámbito de teorías como de nuevos instrumentos que permiten entender la tierra desde el campo de la física[56].

Hoy en día, la geofísica es usada en la ingeniería civil en muchos aspectos que van relacionados desde la construcción de estructuras especiales tales como carreteras, túneles, presas, puentes, entre otros, hasta la caracterización de suelos y sus afectaciones productos de la intervención de nuevas estructuras. Adicionalmente, también tienen gran importancia en el estudio de la sismología[57]. Por estas razones se ha dado una creciente investigación en lo referente al subsuelo desde 1920 logrando así métodos geofísicos que juegan papeles importantes en los sectores de la ingeniería civil como es el riesgo sísmico, la obra pública, la construcción o la localización de recursos naturales[58].

La gran evolución que ha tenido la geofísica se debe a que está conformada por varias disciplinas en las que se encuentra:

- ✓ La geología: Es la ciencia que estudia la estructuración de la tierra, además de los procesos que han dado evolución geológica a lo largo del tiempo sobre la tierra.

- ✓ La física: Es la ciencia que estudia las propiedades de los cuerpos, la energía y las leyes que los rigen.

[55] LORENZO FERRÁS, ARTURO. Breve cronología de los métodos geofísicos. Programa de formación Iberoamericano en materia de aguas. Ciudad de la Habana, Cuba. p. 3.
[56] Ibín., p. 4.
[57] MANILLA ACEVES, ALFONSO. Geofísica aplicada en los proyectos básicos de Ingenieria Civil. Instituto Mexicano del transporte. Publicacion tecnica No 229. Sanfandila, Qro, 2003. p.20.

[58] ALVAREZ REVUELTA, M. Determinación de la amplificación sísmica local en el campus Sur UPM mediante la técnica de sismología de microtremores ReMi. Universidad Politécnica de Madrid. España, 2015. p. 35.

- ✓ La química: Es la ciencia que estudia las propiedades de la materia y las leyes que rigen sus combinaciones y reacciones.

- ✓ La electrónica: Es una ciencia ramificada de la física que estudia la conducción y control de flujo de electrones y de partículas cargadas eléctricamente.

INTRODUCCIÓN

La geofísica es la ciencia que estudia los campos físicos vinculados al planeta y su evolución, además de lograr identificar características actuales del planeta y la ubicación de posibles recursos naturales para su extracción[59], es decir, la geofísica tiene como función describir las propiedades físicas de la tierra tanto desde el campo matemático como observacional y para ello se realizan asignaciones de parámetros físicos a distintas partes.

La principal rama de la geofísica que actúa en la ingeniería civil es denominada geofísica interna, cuya principal función es estudiar los fenómenos físicos que ocurren bajo la superficie terrestre.

Como es de esperarse la evolución de esta ciencia ha llegado a campos de la ingeniería civil, por lo que ha permitido una evolución tanto en la construcción como en la obtención de datos en diversos ensayos usados en obra.

La intervención del suelo en los procesos de excavación sufre alteraciones que dependen en gran medida de varios aspectos como son las características del suelo o de los materiales existentes en la zona, además del proceso de construcción usado en la ejecución de un proyecto. Es por esto que se hace necesario que existan métodos que permitan identificar características del suelo antes de sufrir alteraciones.

Por otro lado en la gran mayoría de proyectos ejecutados en Colombia se usan diversos métodos para la caracterización de suelos ya sean pruebas “in situ” o en el campo, entre las más conocidas se encuentran las de laboratorio como triaxial cíclico, columna resonante RC; además de las “in situ” tales como *Down Hole*, *Cross Hole*, prueba de penetración del cono sísmico SCPT; y finalmente las empíricas

[59] JAIMES VILLAMIZAR, J. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2011. p. 19.

como la prueba de penetración estándar SPT, prueba de penetración del cono CPT, entre otras[60].

Como se puede observar estos métodos usados tienen como desventaja varios factores como son la invasión al terreno en su estado natural lo que puede producir alteraciones de este, alteraciones del terreno, alteraciones de la muestra de terreno debido a que se extraen muestras que pueden ser alteradas inconscientemente ya sea por el proceso de extracción o de transporte a un laboratorio, además pueden haber perdidas de datos ya que al generar sondeos los resultados se obtienen sobre puntos específicos siendo necesario el uso de interpolaciones lo que puede llegar a generar grandes diferencias entre lo que se encuentra en el terreno y lo observado en las muestras.

Debido a esto es que se ha visto la necesidad de generar métodos que permitan obtener datos reales y precisos sobre suelos que serán usados para construcciones futuras. Es en este punto donde los métodos geofísicos cobran gran importancia ya que plantean como solución evitar las problemáticas que se pueden llegar a generar en los métodos tradicionales[61].

Dentro de las principales ventajas que se encuentran con el uso de los métodos geofísicos son los bajos costos de transporte en comparación con los métodos tradicionales debido a la diferencia de tamaño de los instrumentos usados, la caracterización de los suelos es realizada sin afectar el terreno lo que genera muestras con un mayor grado de confiabilidad, zonas con mayor estudio ya que al no realizar perforaciones para la extracción de suelo lo que se hace es un barrido de este obteniendo resultados de toda la zona, entre otros[62].

PRINCIPALES APLICACIONES EN LA INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

Los principales métodos geofísicos usados en la ingeniería civil y en la geotecnia son los métodos sísmicos, los eléctricos en corriente continua y los geo-radares potenciales y electromagnéticos.

Dentro de las principales aplicaciones que tiene la geofísica en la ingeniería civil se encuentra:

[60] Ibín., p. 19.
[61] Ibín., p. 19.
[62] Ibín., p. 19.

- ✓ Conocimiento geológico: Consiste en ubicar materiales específicos y con ello su profundidad y espesor de capas. Además de fracturas o fallas presentadas en el terreno.

- ✓ Procesos de excavación: Consiste en realizar estudios geofísicos previos con el fin de identificar la forma idónea de realizar la excavación dependiendo de los materiales que se encuentran.

- ✓ Definición de módulos elásticos de los materiales: Consiste en identificar diversos módulos tales como Poisson, Young, cizalla, otros.

- ✓ Localización de zonas kársticas, galerías, canalizaciones y tuberías subterráneas, entre otros.

- ✓ Auscultación de túneles y estructuras enterradas.

- ✓ Localización de zonas de filtración.

- ✓ Búsqueda de agua subterránea, detección de cavidades, estudios geotécnicos y exploración de yacimientos metálicos son algunos de las aplicaciones que se puede obtener por medio de la tomografía eléctrica.

FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LOS ENSAYOS GEOFÍSICOS

Los ensayos geofísicos consisten en instrumentos que son capaces de leer diferentes tipos de ondas sísmicas y resistividades del suelo por medio de un procesamiento de datos clasificar diferentes propiedades de los materiales, suelos, yacimientos de minerales, entre otros.

Es importante recordar que las ondas sísmicas son una especie de energía elástica de deformación que viaja desde su fuente u origen hasta el subsuelo a velocidades que dependen de las propiedades de este, ya sean el módulo de elasticidad y densidades del terreno.

Para poder leer las ondas sísmicas es importante que estas se mantengan dentro del rango elástico; y para que esto suceda se debe tener en cuenta diversos factores tales como magnitud, orientación del esfuerzo, tiempo al cual es sometido el

material, amplitud, frecuencia de la onda, estratigrafía, propiedades de los materiales, ubicación del sitio respecto a la fuente sísmica[63].

Dentro de las principales ondas sísmicas existen dos tipos denominadas ondas internas o de cuerpo y ondas superficiales. Las ondas de cuerpo son aquellas que viajan a través del medio y las ondas de superficie las que viajan a lo largo de las interfaces.

ONDAS SÍSMICAS

Una onda es un movimiento que se expande o es transportada debido a una propagación generada al perturbar alguna propiedad del espacio. Debido a lo anterior se puede definir una onda sísmica como un tipo de onda elástica fuerte en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones que genera pequeños movimientos en las placas tectónicas.

La generación de ondas sísmicas puede ser debido a causas naturales o también pueden ser generadas artificialmente. Dentro de las causas naturales se encuentran los movimientos telúricos los cuales producen ondas de mayor tamaño al punto de causar daños en estructuras o fallas en el terreno. Por otro lado, las ondas sísmicas producidas artificialmente pueden ir desde sencillos ensayos generados por golpes hasta el uso de explosivos.

ELEMENTOS

Los elementos de una onda están definidos como las partes que conforman la trayectoria o movimiento que estas ejercen. Dentro de sus partes principales se encuentran:

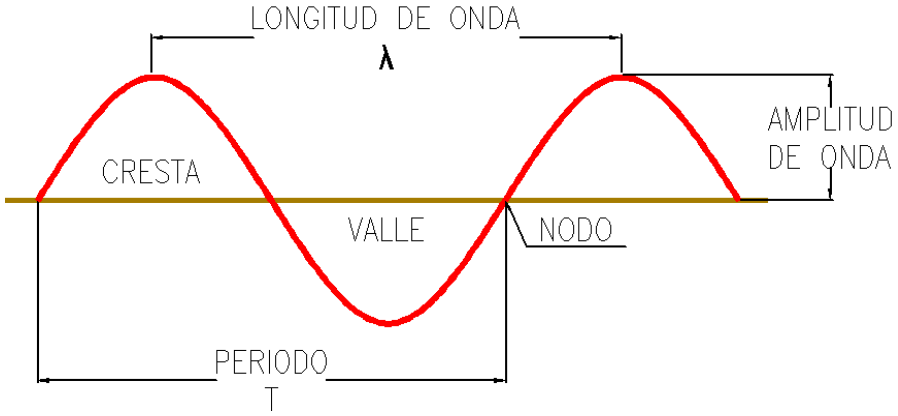
- ✓ Amplitud (A): Es la máxima elongación o altura alcanzada por la onda y va desde el punto de equilibrio o nivel de referencia hasta la cresta o valle.
- ✓ Cresta: Es la parte más elevada de la onda.
- ✓ Valle: Es la parte más baja de la onda.
- ✓ Periodo (T): Es el tiempo que transcurre entre las repeticiones de una onda cuando esta realiza una oscilación completa, es medida en segundos.
- ✓ Frecuencia (f): Es el número de ondas que suceden en una unidad de tiempo, es medida en Hertz.

[63] PEREDO ANDRADE, V. Aplicación del método SASW en suelos. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Abril 2011. p. 45.

- ✓ Longitud de onda (λ): Es la distancia entre sucesivas repeticiones de onda, es decir distancia entre dos crestas o dos valles.

En la figura 128 se observa los principales elementos que conforman la onda.

Figura 128. Elementos de una onda.



FUENTE: ALVAREZ REVUELTA, M. Determinación de la amplificación sísmica local en el campus Sur UPM mediante la técnica de sismología de microtremores ReMi. Universidad Politécnica de Madrid. España, 2015. p. 12.

PROPIEDADES

Las ondas sísmicas tienen un comportamiento similar al propagarse y experimentan diversos fenómenos que pueden ser clasificados en:

- ✓ Propagación: Depende principalmente del medio por el que se desplace la onda, es decir va en función del material delimitado por características como si es finito o no finito, lineal o no lineal, homogéneo o isotrópico[64].

- ✓ Reflexión: Esta propiedad de la onda ocurre cuando un cuerpo obstaculiza su trayectoria y esta se ve obligada a cambiar su dirección. Cuando esto ocurre también puede ocurrir que cierta cantidad de energía que transporta la onda es absorbida por el cuerpo que la obstaculiza y otra parte de energía se devuelve por el medio en el que se desplaza.

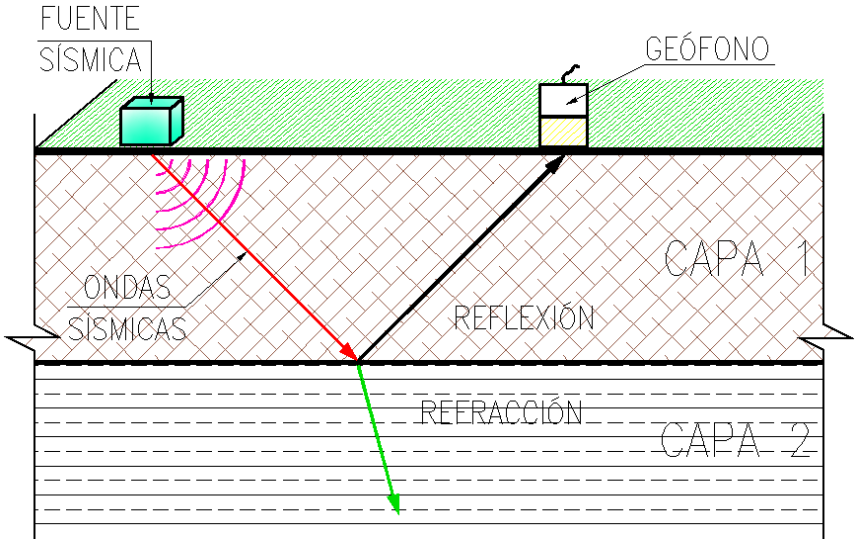
  En el fenómeno de la reflexión no ocurre un cambio ni de velocidad ni de densidad de la onda, consecuencia a esto la onda reflejada permanece en el mismo medio y se desvía un cierto ángulo respecto a la inicial.

[64] ALVAREZ REVUELTA. Op. Cit,. p. 35.

- ✓ Refracción: Cuando esto ocurre las ondas tienen un cambio de velocidad de propagación debido a que cambia el medio de transporte, por lo tanto, una determinada cantidad de energía se transfiere al medio en el que se transporta y otra parte se propaga en el nuevo medio.

En la figura 129 se observa cómo se genera una onda sísmica de forma artificial y debido a un cambio de medio de transporte ocurre el proceso de reflexión devolviendo la onda en el medio inicial. Por otro lado, al haber la transición de la capa 1 y la capa 2 se observa el proceso de refracción iniciando así, la onda en un nuevo medio.

Figura 129. Ondas de reflexión y refracción.

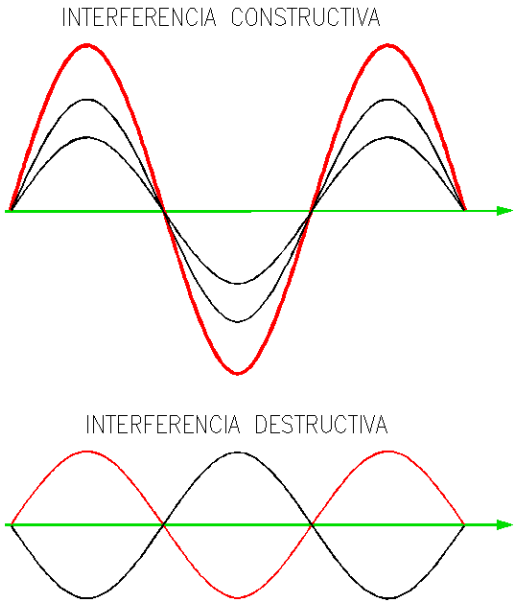


- ✓ Interferencia: ocurre cuando existen varias fuentes emisoras en un mismo sitio con diferentes velocidades de propagación generando así interferencias constructivas o destructivas. Las interferencias constructivas ocurren cuando las ondas llegan en concordancia de fases y la interferencia destructiva cuando llegan en oposición de fases.

  Cuando ocurren las interferencias constructivas la potencia de la onda aumenta y se genera como resultado una amplitud mayor de las ondas. Por el contrario en las interferencias destructivas el resultado en el punto de incidencia de las ondas es menor que el provocado por cada una de ellas hasta llegar el punto de anularse.

En la figura 130 se muestran dos gráficas que representan tanto la interferencia constructiva como destructiva.

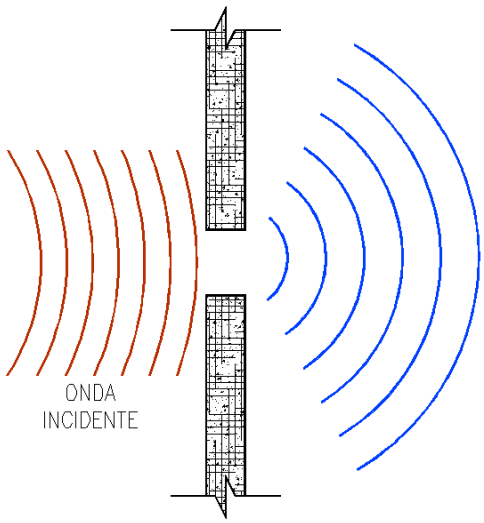
Figura 130. Interferencia constructiva y destructiva de las ondas.



FUENTE: Interferencia destructiva y constructiva de una onda. [En línea]. (Recuperado en 26 junio 2017). Disponible en http://edwicarval.wixsite.com/fisicaondasyelectro/interferencia-destructiva-y-constructiva

- ✓ Difracción: Ocurre cuando las ondas encuentran un obstáculo u orificio y esta busca continuar su movimiento ondulatorio rodeando dicho obstáculo. En la figura 131 se observa la característica de difracción que presentan las ondas.

Figura 131. Difracción de las ondas.



TIPOS

Cabe recordar que las ondas sísmicas son oscilaciones que se propagan desde una fuente tanto natural como artificial a través de un medio elástico transportando energía mecánica. El medio en el cual se propagan estas ondas puede ser en medios materiales, tanto líquidos como sólidos[65].

Las ondas sísmicas son clasificadas en internas o superficiales. Las internas viajan en el interior de la tierra y se clasifican en primarias (P) y secundarias (S). Por otro lado, las superficiales como su nombre lo indican se desplazan por la superficie del planeta y se dividen en ondas love (L), ondas Rayleigh (R) y oscilaciones libres.

A continuación, se explicará cada una de estas ondas debido a la importancia que tienen en los reportes con ensayos geofísicos ya que estas son las ondas que generalmente leen estos instrumentos.

ONDAS INTERNAS O DE CUERPO

Este tipo de ondas viaja a través del interior del suelo y siguen caminos curvos debido a la diferencia de densidad y a la composición que presenta la tierra. Este tipo de ondas son las que transmiten los temblores preliminares de un terremoto, sin embargo, poseen un nivel muy bajo de destrucción.

[65] APONTE GONZALEZ. Op. Cit, p. 15.

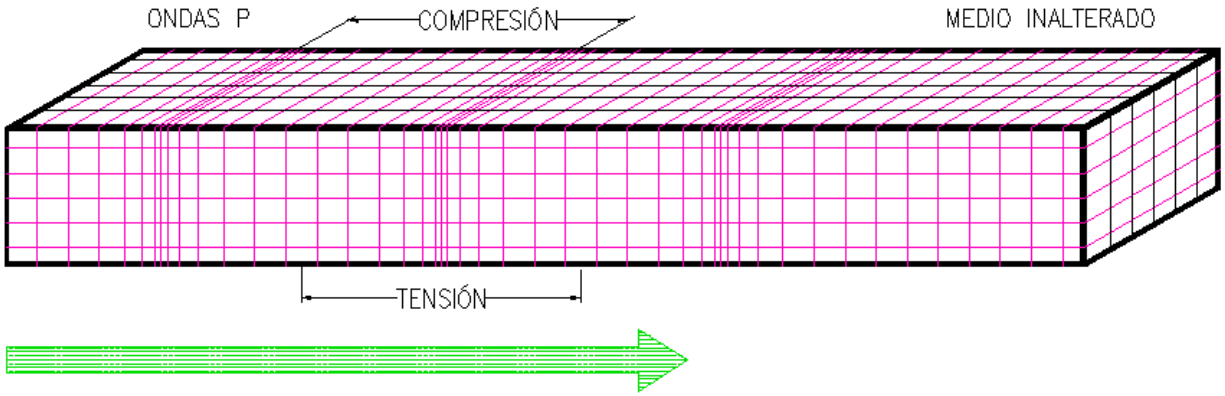
ONDAS PRIMARIAS (P)

Son también denominadas ondas longitudinales o de compresión porque su dirección de oscilación va relacionada con la propagación, esto quiere decir que el material se ve sometido de manera alternada a movimientos de compresión y tracción.

Este tipo de ondas viaja a una velocidad entre 70% y 140% mayor que las ondas secundarias cuando los valores de relación de poisson se encuentran entre 0,25 y 0,40 lo cual es característico tanto en suelos como en rocas[66].

En la figura 132 se observan las zonas de compresión y tracción que presentan las ondas primarias.

Figura 132. Ondas de cuerpo: Ondas primarias.



FUENTE: APONTE GONZALEZ, J. Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, 2011. p.13.

Generalmente, para identificar la velocidad de las ondas primarias se realizan pruebas de refracción sísmica.

ONDAS SECUNDARIAS (S)

Son también denominadas ondas de corte u ondas transversales secundarias y son de gran utilidad en la geotecnia ya que sirven para determinar el módulo de rigidez al esfuerzo cortante, estimar estados de esfuerzos, evaluar la alteración de muestras, entre otras[67]. Para el cálculo de la velocidad de onda de corte generalmente se utilizan pruebas como el *DownHole* y *CrossHole*.

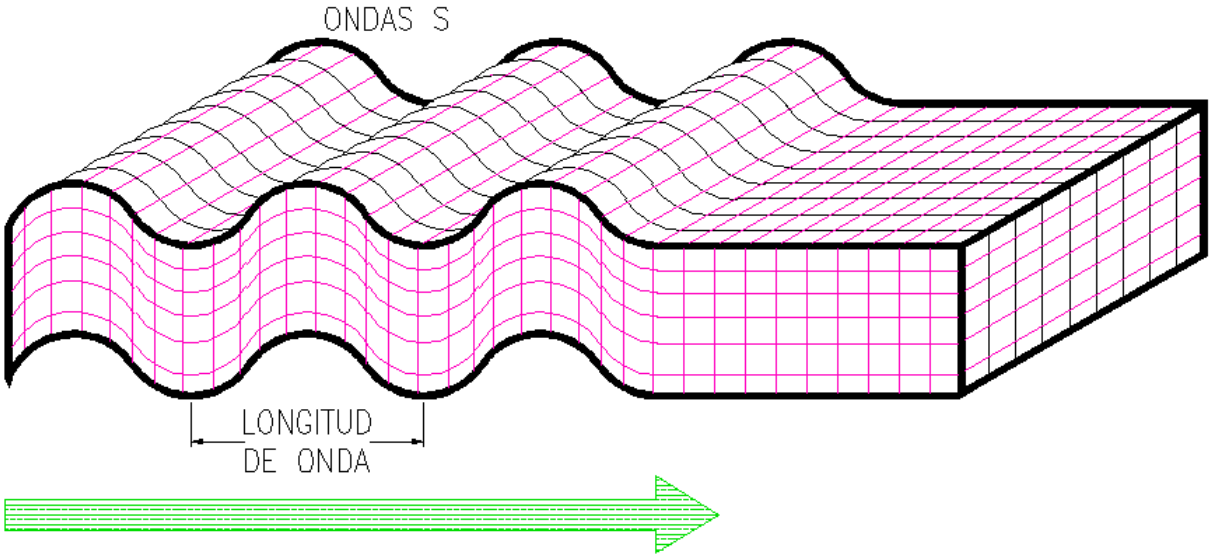
[66] APONTE GONZALEZ. Op. Cit, p. 15.
[67] Ibíd. p. 16.

Las ondas secundarias son aquellas que tienen desplazamientos transversales a la dirección de propagación y es debido a esto que su velocidad es menor que las ondas primarias al ser estas transportadas de forma longitudinal.

Este tipo de ondas son las que generan las mayores oscilaciones durante los temblores o terremotos y por ende producen los mayores niveles de destrucción. Es importante recalcar que estas ondas solo se trasladan a través de materiales sólidos.

En la figura 133 se observa el movimiento ondular de este tipo de ondas y con ello su longitud.

Figura 133. Ondas de cuerpo: Ondas secundarias.



FUENTE: APONTE GONZALEZ, J. Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, 2011. p.13.

Es importante tener en cuenta que la toma de datos de las ondas secundarias aparte de ser costosas y requerir grandes tiempos para obtener resultados tiene limitaciones ya que son métodos invasivos al terreno y la profundidad de penetración es limitada. Es por esto que los métodos usados para el cálculo de ondas superficiales brindan una mayor ventaja ya que no son invasivos y por ende una menor inversión a la hora de obtener resultados[68].

[68] PADRON LUGO, M. Caracterización geofísica del suelo somero mediante ReMi en el área metropolitana del Norte de Anzoátegui. Universidad Simón Bolivar. Sartenejas, Octubre 2012. p. 46.

ONDAS SUPERFICIALES

Las ondas superficiales en eventos sísmicos son las producidas por las ondas internas cuando estas llegan a la superficie, como su nombre lo indica este tipo de ondas se transporta a través de la superficie terrestre y son las causantes de los daños ocurridos en las construcciones debido a los eventos sísmicos.

Es importante resaltar que al ser golpeada la superficie de un depósito de suelos el 67% de la energía aplicada es propagada como ondas Rayleigh, un 28% restante como ondas secundarias y finalmente un aproximado del 7% para las ondas primarias[69].

OSCILACIONES LIBRES

Las oscilaciones libres se pueden definir como vibraciones de la tierra en su totalidad. Este tipo de ondas ocurre en terremotos de gran magnitud o de gran intensidad.

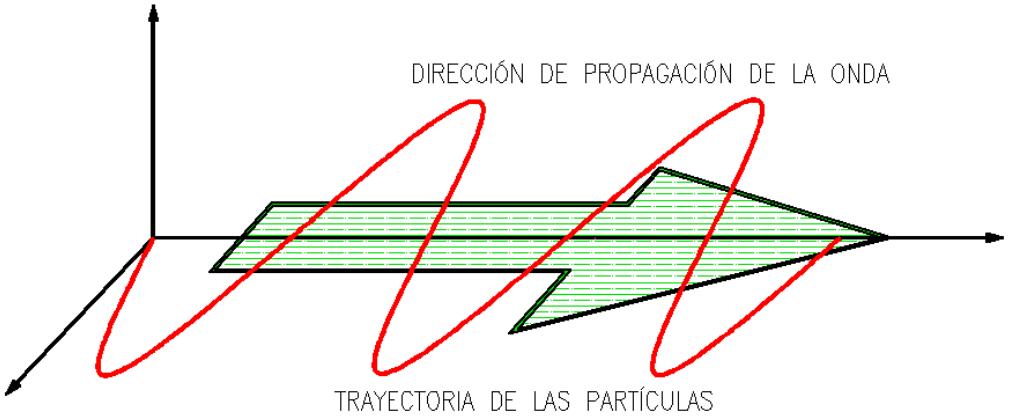
ONDAS DE LOVE

Son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal, sin embargo, para producir dicho movimiento se propaga por medio de un movimiento transversal al igual que las ondas S. La velocidad de las ondas Love es aproximadamente un 90% de la velocidad de las ondas secundarias y es un poco mayor a la velocidad de las ondas Raleigh.

Este tipo de ondas se presentan cuando existen medios estratificados con diferentes características o cuando hay capas superficiales muy blandas sobre materiales rígidos. En la figura 134 se observa la forma de propagación de las ondas Love.

[69] Ibíd., p. 49.

Figura 134. Forma de propagación de las ondas Love.



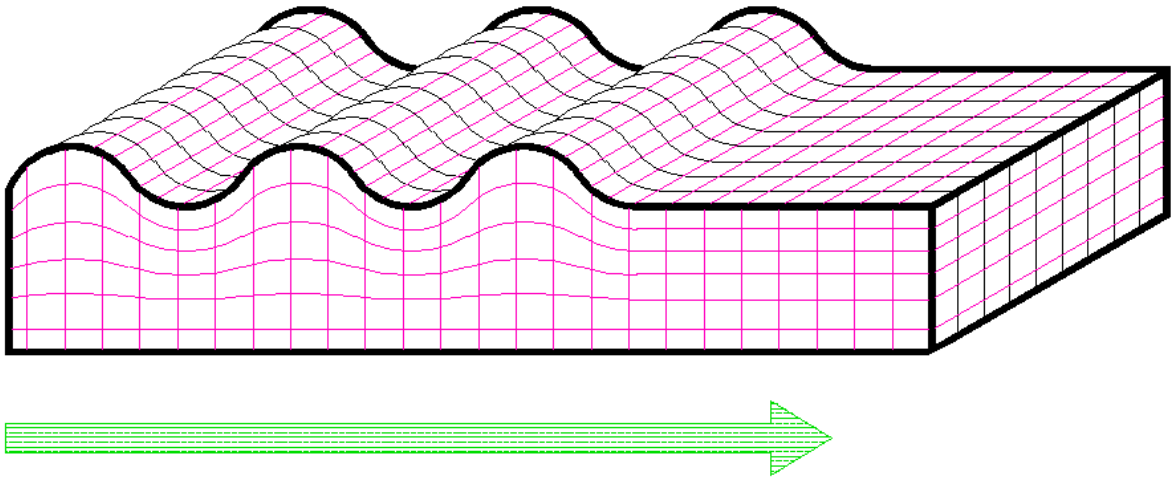
FUENTE: ALVAREZ REVUELTA, M**.** Determinación de la amplificación sísmica local en el campus Sur UPM mediante la técnica de sismología de microtremores ReMi. Universidad Politécnica de Madrid. España, 2015. p.12.

ONDAS DE RAYLEIGH

Son ondas superficiales también denominadas ground roll las cuales producen movimientos elípticos verticales en el suelo. Son ondas más lentas que las ondas de cuerpo y la velocidad de propagación es aproximadamente un 90% de la velocidad de las ondas secundarias.

En la figura 135 se observa la forma como se propagan las ondas Rayleigh a lo largo del suelo.

Figura 135. Programación de las ondas Rayleigh.



FUENTE: APONTE GONZALEZ, J. Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, 2011. p.15.

ENSAYO MASW

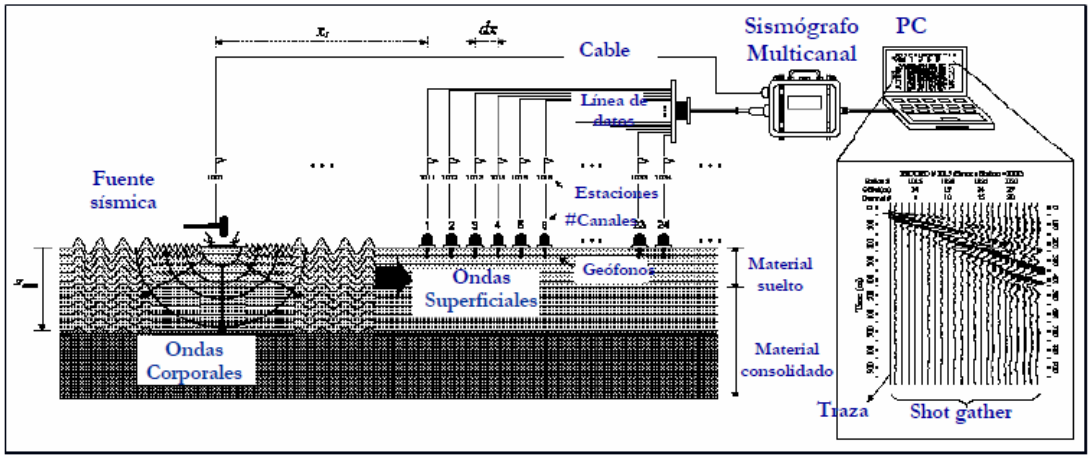
Este ensayo geofísico nace como resultado de algunos defectos encontrados en otros ensayos como es el SASW en presencia de ruidos. Es un método sísmico no destructivo que evalúa los módulos elásticos del suelo. Para su funcionamiento analiza las propiedades de propagación de las diferentes ondas sísmicas superficiales principalmente las ondas Raleigh las cuales se desplazan horizontalmente a lo largo de la superficie desde un punto de impacto hasta los receptores.

Los registros tomados en este tipo de ensayo son obtenidos por medio de receptores denominados geófonos los cuales varían entre 12 o más. La distancia a la cual son situados los geófonos puede variar entre distancias cortas de 1 a 2 metros y distancias largas entre 50 a 100 metros.

Los registros son provenientes de una fuente impulsiva o vibratoria que con la ayuda de los geófonos logra obtener una estadística para medir las velocidades de fase.

El principal objetivo en este ensayo es obtener frecuencias variables con el tiempo, además permitir la identificación y rechazo de modos no fundamentales de ondas Raleigh y de cualquier otro ruido que no pertenezca a la del ensayo. En la figura 136 se observa el proceso de ejecución de un ensayo MASW.

Figura 136. Proceso de ejecución de un ensayo MASW.



FUENTE: LINARES MONTENEGRO, G. Introducción y aplicación del método de sísmica de microtemores en áreas urbanas. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Noviembre 2005. p. 26.

Como se puede observar se ubica una platina metálica que es golpeada con la ayuda de un martillo y por medio de esta se genera una serie de ondas tanto

corporales como superficiales. Las ondas superficiales (como las Rayleigh) son propagadas debido a la fuente sísmica que genera la platina al ser golpeada con el martillo y estos datos son tomados por los receptores o geófonos los cuales llevan la información tomada a un sismógrafo multicanal y allí con la ayuda de programas computacionales se obtiene el procesamiento de los datos.

Es importante tener en cuenta que a medida que se tiene una mayor cantidad de geófonos se pueden obtener datos con menores incertidumbres y por ende más reales.

Adicionalmente, a la hora de realizar este tipo de ensayos se debe tener precaución con la separación entre los geófonos, principalmente cuando la distancia entre ellos es pequeña ya que los ruidos externos pueden llegar a alterar los resultados.

Uno de los principales errores que se puede obtener durante el procesamiento e interpretación de resultados es tener una mala interpretación sobre las características de las "*data*". Además, no es fácil predecir si un sitio es normalmente disperso[70].

ENSAYO REMI

El ensayo REMI es también denominado ensayo sísmico de microtemores. Es un método que sirve para tener información general en una dimensión de grandes volúmenes de suelo, por medio de mediciones "in situ" de perfiles de velocidad de ondas de corte usando como fuente el ruido ambiental.

Es uno de los ensayos más usados de la geofísica en la sísmica pasiva de la ingeniería civil. Este tipo de ensayos se deriva del ensayo MASW y tiene como particularidad que toma lectura de varias frecuencias tanto ambientales como artificiales (impactos, vehículos en circulación, explosiones, uso de maquinaria, otras).

Generalmente este tipo de ensayo se realiza con 24 geófonos los cuales son dispositivos capaces de tomar las lecturas de las frecuencias. Adicionalmente a la hora de realizar este ensayo se debe tener en cuenta que la separación entre estos instrumentos (Geófonos) deben tener la misma distancia con el fin de obtener resultados coherentes.

[70] LINARES MONTENEGRO. Op Cit, p. 26.

El ensayo REMI permite separar las ondas Rayleigh de las ondas elásticas para así determinar la variación de velocidad de las ondas de corte en profundidad. Este ensayo puede ser utilizado sin problemas en ambientes urbanos o zonas industriales, por lo que no existen limitaciones en la toma de resultados ya que de hecho cuando existen mayores ruidos los resultados mejoran debido a una mayor intensidad de ondas por lo que es factible obtener con mayor claridad parámetros del suelo.

Dependiendo de las propiedades del subsuelo con este ensayo se puede determinar velocidades de onda de cizalla a un mínimo de 40 metros y un máximo de 100 metros de profundidad.

Para la realización de los ensayos REMI se utiliza una serie de geófonos de componente vertical ubicados a lo largo de una línea de registro para posteriormente realizar las diferentes lecturas con una variación de registro de al menos 30 segundos y una razón de muestreo suficiente. En el caso que no se presenten ruidos suficientes para la toma de datos se le puede dar solución con una fuente sonora o con otras medidas como es golpeando el terreno con un mazo.

Dentro de las principales aplicaciones que tienen los métodos REMI y MASW se encuentran la definición y mapeo de la estratificación sísmica, identificación de elementos geológicos en el subsuelo, definición de parámetros elásticos, dinámicos y geotécnicos, verificación del potencial de licuefacción, cálculo del espectro de respuesta, definición del tipo de suelo, entre otros.

Dentro de las limitaciones de este tipo de ensayo se encuentra la mala lectura de estos ya sea por una incorrecta ubicación de los geófonos o por imperfecciones equivocas de los resultados por parte del técnico o especialista[71].

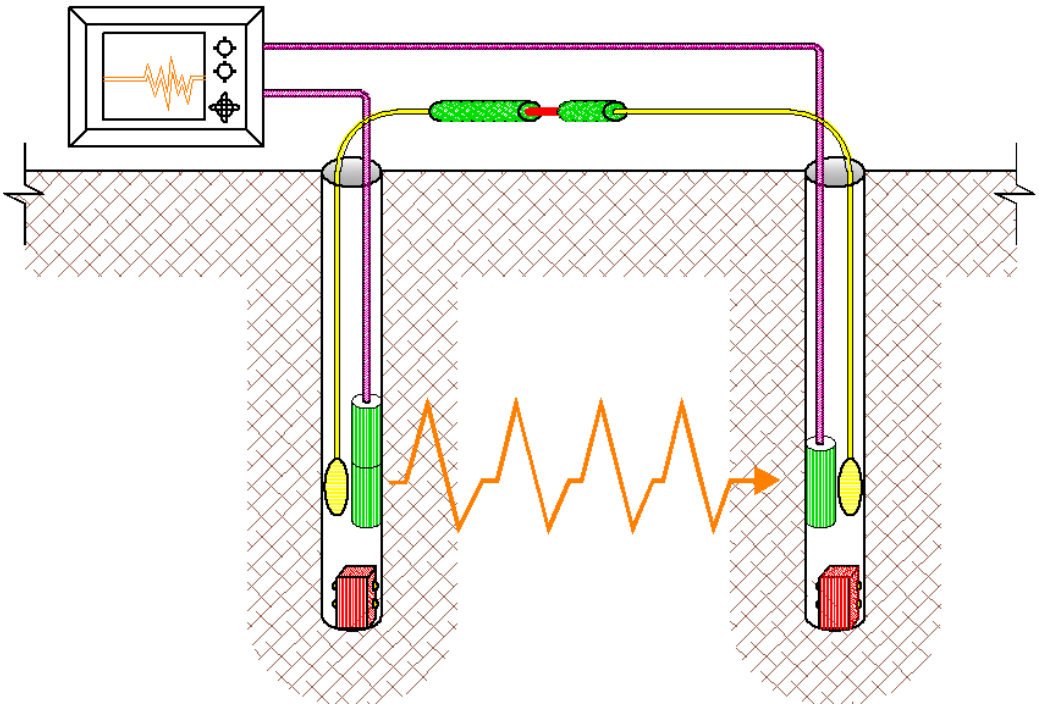
ENSAYO CROSSHOLE

Este método fue estandarizado en 1984 por la ASTM (American Society for Testing Materials). Consiste en realizar dos o más sondeos y así detectar tanto las ondas primarias como secundarias de forma horizontal. Para tal efecto en uno de los sondeos se introduce una fuente que libera energía y en la otra u otras perforaciones se ubican receptores para así medir las velocidades generadas por la fuente

[71] ORDOÑES, FRANCISCO. Ensayos geofísicos Remi-tomografia líneas L1 y L2 proyecto planta de tratamiento la pradera. Intensa Ingeniería Inteligente. Octubre 2013. p. 40.

artificial. En la figura 137 se observa esquemáticamente cómo funciona el ensayo *crosshole*.

Figura 137. Ensayo crosshole esquemáticamente.

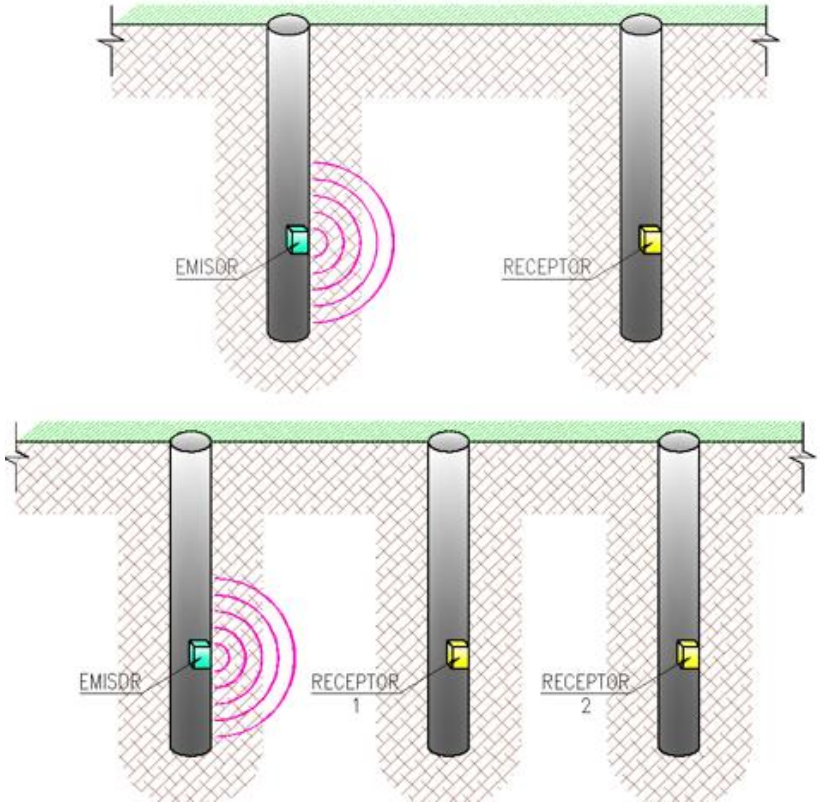


FUENTE: ALVAREZ REVUELTA, M**.** Determinación de la amplificación sísmica local en el campus Sur UPM mediante la técnica de sismología de microtremores ReMi. Universidad Politécnica de Madrid. España, 2015. p.15.

Es importante tener en cuenta que la distancia entre las perforaciones debe ser pequeña y adicionalmente tener un gran cuidado durante la medición de datos ya que detalles como la orientación del sondeo o la ubicación de los receptores que miden la velocidad de propagación de las ondas pueden arrojar como resultados datos incongruentes.

En la figura 138 se muestra un esquema general del ensayo *CrossHole* cuando se utilizan dos y/o tres sondeos.

Figura 138. Esquema general de 2 y 3 sondeos usando el ensayo CrossHole.



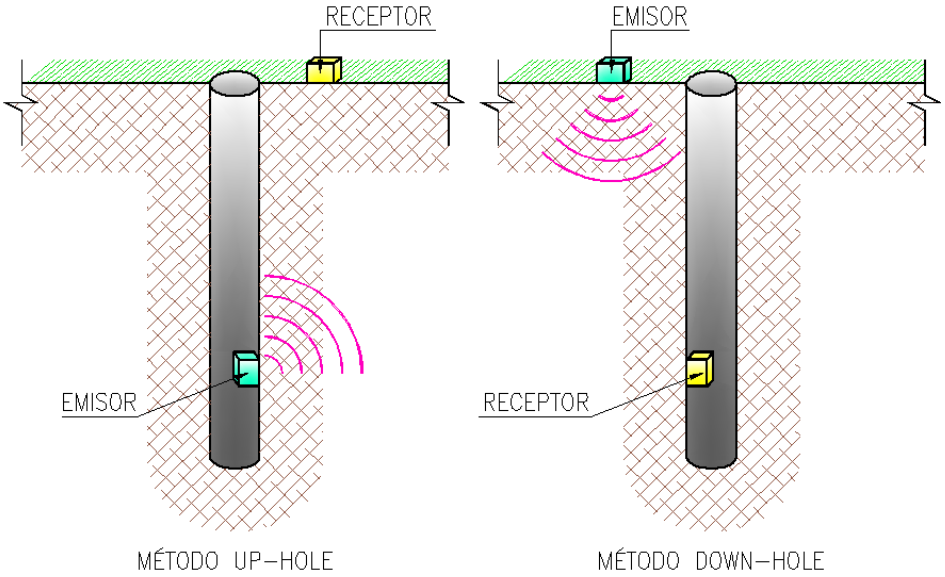
FUENTE: APONTE GONZALEZ, J. Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, 2011. p.19.

Con el fin de minimizar errores en la toma de datos se recomienda el uso de tres sondeos. Además, se debe tener una distancia correcta entre las perforaciones ya que si están muy distanciadas no es posible obtener velocidades de ondas sísmicas con gran precisión.

ENSAYOS DOWN-HOLE Y UP-HOLE

Estos ensayos son similares al *Cross-Hole*, sin embargo, presentan una gran diferencia al solo necesitar un sondeo. En el ensayo *Up-Hole* ubica la fuente en la perforación, y el receptor o dispositivo que lee las ondas en la superficie del terreno. Por otro lado, el ensayo *Down-Hole* se ubica la fuente en la superficie y el receptor de ondas a diferentes profundidades de la perforación. En la figura 139 se observan los ensayos *Up-Hole* y *Down- Hole* respectivamente.

Figura 139. Ensayo Up-Hole y Down-Hole.



FUENTE: APONTE GONZALEZ, J. Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá, 2011. p.19.

El objetivo principal de este tipo de ensayos es medir el tiempo de viaje de la onda generada desde la fuente artificial hasta el receptor y se realiza una gráfica del tiempo de llegada vs la profundidad a la que se encuentra el emisor o receptor dependiendo del tipo de ensayo usado (*Down-Hole*, *Up-Hole*). Para obtener la velocidad de propagación de la onda se utiliza la inversa de la pendiente obtenida en la gráfica anterior.

Entre los dos métodos el de mayor uso es el *Down-Hole*, debido a que genera con mayor facilidad ondas de corte u ondas secundarias. Sin embargo, estos métodos son costosos debido a los instrumentos usados y a que se debe realizar la perforación, además el nivel de incertidumbre limita este tipo de ensayos ya que se debe tener una gran precisión en los tiempos cuando se realiza la toma de datos[72].

[72] PEREDO ANDRADE. Op. Cit. p. 47.