

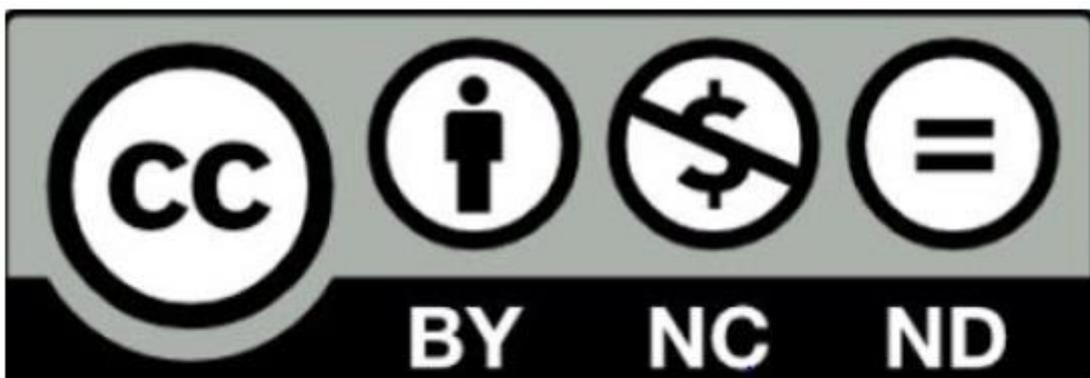
EVALUACIÓN TÉCNICA Y ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVO DE MICROPILOTES Y ANCLAJES.

NATALIA GÓMEZ MONTOYA

INGENIERIA CIVIL

**Asesor:
HERNÁN DARÍO GONZÁLEZ ZAPATA**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
MEDELLÍN
2019**



Todo trabajo que contenga esta imagen representa una Licencia Creative Commons de Atribución – No comercial – Sin Derivar. Esta licencia es la más restrictiva, sólo permite que otros puedan descargar las obras y compartirlas con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se pueden cambiar de ninguna manera, ni se pueden utilizar comercialmente.

TABLA DE CONTENIDO

1	Resumen	4
2	Introducción	5
3	Objetivos	7
3.1	Objetivo general.....	7
3.2	Objetivos específicos.....	7
4	Marco teórico.....	7
4.1	Micropilotes.....	8
4.1.1	Principales aplicaciones	9
4.1.2	Aspectos de diseño	11
	Estados limites últimos:.....	11
	Fallo de estabilidad global:.....	11
	Fallo de capacidad de soporte del terreno	11
	Fallo estructural:	12
	Estado límite de servicio:.....	12
	Comprobaciones adicionales.....	12
4.1.3	Pruebas de carga	14
4.1.4	Grupo de micropilotes	15
4.2	Anclajes	15
4.2.1	Aspectos generales:	15
4.2.2	Operaciones.....	16
4.2.3	Tensado del anclaje	17
4.3	Proceso constructivo	17
4.3.1	Perforación.....	18
4.3.2	Inyección.....	23
4.3.3	Ensayos de suelos útiles	27
5	Metodología	28
6	Resultados y análisis.....	31
6.1	Perforación.....	31

6.2	Armadura – proceso de armado:	35
6.2.1	Anclajes activos	35
6.2.2	Anclajes pasivos.....	35
6.2.3	Micropilotes.....	36
6.3	Riesgos.....	36
6.3.1	Para el personal	36
6.3.2	Ambientales.....	37
6.4	Recomendaciones especiales:.....	38
6.5	Inyección.....	39
7	Conclusiones	42
8	Referencias Bibliográficas	43

1 Resumen

Los micropilotes son elementos usados como fundaciones en terrenos que no son poco competentes, por lo tanto se requiere de cimentaciones profundas para garantizar la estabilidad de la estructura que se vaya a realizar, los micropilotes además de servir como fundación, también actúa como mejorador de suelo debido a la inyección de lechada que se realiza dentro de su proceso constructivo, estos elementos también pueden ser empleados como sistema de contención al construirse en pantalla y con una viga cabezal que garantice un funcionamiento conjunto, en estos casos es recomendable realizar micropilotes inclinados además de los verticales, con el fin de garantizar una mejor resistencia a los empujes generados por la masa de tierra a contener.

Los anclajes, tanto activos y pasivos son elementos empleados para la estabilización de taludes, se emplean los anclajes pasivos en terrenos donde no se ha presentado fallas ni signos de inestabilidad considerables ya que estos elementos funcionan por fricción, y en terrenos que ya presentan desgarre, ya hay una masa suelta que no garantiza que estos funcionen de manera adecuada, en el caso de los anclajes activos, si pueden ejecutarse en terrenos con signos de inestabilidad avanzados, ya que estos funcionan debido al tensado que se realiza a los cables al final del proceso constructivo.

La ejecución de micropilotes y anclajes tienen las mismas actividades base: perforación, llenado e inyección, sin embargo, guardan ciertas diferencias relacionadas con las inclinaciones tratadas, los requerimientos constructivos, sistemas de funcionamiento, etc.

Las actividades de perforación e inyección guardan cierto grado de dificultad debido a que no se cuenta con información suficiente ni normas que regulen los procesos constructivos, por ello siempre se tiene gran incertidumbre al ejecutar la construcción de estos elementos, lo cual da paso a ciertos riesgos derivados del poco conocimiento, por ello, es preferible que las actividades sean ejecutadas por personas con experiencia

En este informe se explicarán los procesos que deben ejecutarse para hacer menos tediosas estas labores, además de abordar las problemáticas típicas que se presentan proponiendo soluciones para ello, se describirá de manera más amplia cada elemento, así como su funcionamiento, la maquinaria empleada y recomendaciones generales.

2 Introducción

La geotecnia es una rama de las ramas de la ingeniería, esta una función de gran importancia en cualquier tipo de obra, ya sean edificaciones, vías, tanques de almacenamiento, presas, etc. Ya que todas se encuentran apoyadas sobre el suelo; esta rama es la encargada de realizar los estudios de suelos con el fin de determinar las propiedades mecánicas de los mismos e identificar las condiciones particulares de estos, como contenido de humedad, nivel freático, relación de vacíos, entre otros. Por medio de estos estudios, los cuales deben ser muy rigurosos, se define qué tipo de cimentación es más apropiada según la obra que se vaya a construir, las estructuras de contención necesarias de manera que se garantice la seguridad y estabilidad de las obras, y en el caso de las vías, se definen los espesores requeridos según el tráfico vial al que vayan a ser sometidas con la intención de que no se presenten daños en la superficie de rodadura durante el tiempo de vida útil; en esta decisión influyen aspectos económicos, estéticos y obviamente los aspectos ingenieriles, los últimos buscan que no se presenten asentamientos excesivos que ocasionen desde fisuras en los elementos no estructurales que no comprometan como tal la estabilidad, hasta grietas que lleven a la estructura hasta un fallo, no solo busca que la obra sea estable después de terminada, además considera los estudios de estabilidad durante el proceso de construcción de manera que no se presenten inconvenientes durante la construcción que comprometa la estabilidad de esta, evitando así sobrecostos.

El área de la geotecnia es muy amplia, debido a que los suelos guardan grandes diferencias incluso en una misma zona de estudio, sin embargo las estructuras a tratar no guardan mucha variedad debido a que se trabajan siempre los mismos elementos, ya sea para cimentaciones o estructuras de contención para masas de suelo, lo único que varía son las consideraciones constructivas según el tipo de suelo a tratar, ya que no es lo mismo construir en suelos blandos con alto contenido de humedad que en suelos duros totalmente secos.

Los elementos estructurales usados para las cimentaciones se dividen en dos clases: las de tipo superficial o las de tipo profundas; las cimentaciones superficiales son bastante comunes debido a que son más económicas y tienen un muy buen funcionamiento, pero solo pueden usarse en obras pequeñas, donde no se tienen muchos requerimientos ni cargas excesivas y, además, el suelo garantiza un buen comportamiento, es decir, presenta buenas propiedades mecánicas en sus capas más superficiales, garantizando así una buena

respuesta a la transmisión de cargas por medio de estas estructuras, sin embargo, esto no siempre se consigue, sobre todo cuando se trata de obras más grandes donde las cargas transmitidas al suelo son altas, en estos casos ya deben considerarse cimentaciones profundas, estas guardan una complejidad constructiva mayor que las mencionadas anteriormente, además de ser más costosas, sin embargo se hacen muy necesarias. Dentro de esta clase de cimentaciones se encuentran las pilas, pilotes y micropilotes, la geometría de los 3 elementos es típicamente circular, su diferencia radica en el diámetro, tipo de refuerzo empleado y el método constructivo. Las pilas se construyen en su mayoría manuales, y tienen grandes diámetros, ya que debe tener el espacio suficiente para que una persona pueda entrar a esta y maniobrar dentro de ella, los micropilotes y pilotes, a diferencia de las pilas, tienen diámetros pequeños por lo que solo pueden ser construidos de manera mecánica, (los pilotes pueden ser manuales pero solo hasta dos metros de profundidad); la diferencia entre estos radica en el tipo de armadura empleada y el tipo de llenado, mientras los pilotes se realizan con hormigón y se vacían a gravedad, los micropilotes se realizan con lechada y en su gran mayoría se inyectan a presión. La ventaja que presentan los micropilotes por encima de las pilas viene dada desde los rendimientos, ya que la ejecución de los micropilotes es mucho más rápida por el hecho de realizarse de manera mecánica.

En el caso de las estructuras de contención, las más simples y económicas son aquellas cuyo método de funcionamiento es a gravedad, ya sean gaviones, muros masivos o en voladizo, la restricción para estos suele ser en su mayoría el espacio requerido para que puedan construirse, además no funcionan para intervenir taludes que ya presentan signos avanzados de inestabilidad. En estos casos, suelen usarse los anclajes, ya que dichas estructuras no ocupan mucho espacio, se ejecutan rápidamente, se pueden emplear en zonas que ya manifiestan signos de inestabilidad y presentan muy buen comportamiento, aun cuando las solicitaciones son altas, los anclajes pueden ser pasivo o activos, ambos guardan muchas diferencias y se usan de acuerdo a los requerimientos y el tipo de suelo a contener. Los micropilotes también son usados como estructura de contención.

Este trabajo se centrará en los micropilotes y anclajes, se tratarán algunos aspectos a considerar en los diseños, sin embargo, se centrarán en los procesos constructivos debido a su complejidad y a la poca literatura existente.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar evaluación técnica a cerca de los procedimientos constructivos para la ejecución de perforaciones e inyección para la construcción de micropilotes y anclajes, con la intención de obtener mejores rendimientos y disminuir los riesgos derivados de estas actividades tanto para el personal como para la estabilidad del terreno, dando recomendaciones constructivas que apliquen de manera general, basándose en la experiencia adquirida mediante la ejecución de dichas actividades, con el fin de subsanar la falta de normativa, guías e información existente al respecto.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar y mitigar los riesgos que generan las actividades de perforación e inyección al terreno, realizados para la construcción de micropilotes y anclajes, según los tipos de suelos, estructuras aledañas y maquinaria empleada.
- Analizar los riesgos a los que están sometidos los operarios que realizan las actividades de perforación, buscando la manera de que estos se vean reducidos significativamente.
- Describir los tipos de perforación empleados, así como el tipo del suelo al que mejor se adapte con el fin de obtener mejores rendimientos
- Establecer una relación entre el tipo de suelo, su resistencia y estado general de este con el fluido de perforación adecuado, de manera que se obtengan mejores rendimientos

4 Marco teórico

En cualquier obra es primordial garantizar la estabilidad de los terrenos en los que se estén apoyando, y es muy común tener que realizar movimientos de tierra ya sea cortes o llenos, estos movimientos típicamente requieren estructuras de contención, ya sea porque se consideró inicialmente en los diseños, o porque con algún cambio en las condiciones de frontera, los taludes presenten signos de inestabilidad, esto también puede suceder con los taludes previamente existentes.

Los micropilotes y anclajes son elementos de gran importancia en la geotecnia, ya sea como cimentación o como sistema de contención

en el caso de los micropilotes, o en el caso de los anclajes, solo como sistema de contención.

Los anclajes activos tienen una excelente respuesta cuando se tienen grandes sollicitaciones, incluso en terrenos que ya fallaron, es decir, ya se presentó algún tipo de deslizamiento. Los anclajes pasivos funcionan muy bien cuando el suelo tiene buenas propiedades mecánicas, sin embargo, no es capaz de sostenerse por sí solo, ya sea porque se le aplicaran nuevas cargas al terreno, o se va a realizar un corte, en el que el talud generado no cumpla con los factores de seguridad exigido por la norma. Estos elementos presentan una gran ventaja frente a otros elementos, debido a que el espacio que ocupan es menor, además se pueden realizar en taludes totalmente verticales.

Los micropilotes se vuelven apropiados por varias razones, tienen mejores rendimientos frente a otros tipos de elementos como las pilas y actúan como mejoradores de suelo debido a la lechada usada para recubrir la armadura.

A continuación, se ampliará más la información de cada elemento mencionado, así como el procedimiento constructivo.

4.1 Micropilotes

Los micropilotes son elementos estructurales que tienen varias particularidades, una de ellas es que poseen pequeños diámetros, normalmente no superan los trescientos milímetros (300mm), se perforan de manera mecánica, el refuerzo empleado se realiza con acero reforzado y se inyectan con lechada ya sea en una o varias fases [1]. Según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.7), estos elementos se pueden clasificar según los siguientes aspectos:

- La manera en que se transmiten los esfuerzos al terreno alrededor del elemento:
 - o Funcionando individualmente como cimentación profunda, los esfuerzos los transmite a través de la punta y la fricción generada a lo largo del elemento
 - o Funcionando en grupo sobre un determinado sector
- Los mayores esfuerzos a los que esté sometido el elemento:
 - o Esfuerzos de compresión o tracción, es decir, los esfuerzos que se dan paralelos al elemento, esto ocurre normalmente cuando se usan los micropilotes como cimentación.
 - o Esfuerzos cortantes y momentos flectores, es decir los esfuerzos que tratan de romper el elemento, dichas sollicitaciones son comunes cuando se utilizan los

micropilotes como estructuras de contención de taludes y laderas.

- Sistema de inyección de lechada:
 - o Inyección única y global (IU), esta inyección se realiza en una sola fase, por lo que solo llena la perforación alrededor de la armadura.
 - o Inyección repetitiva (IR), se realizan hasta dos reinyecciones por medio de tubos o circuitos con válvulas antirretorno, la inyección se realiza a presión y busca sellar grietas y aumentar el diámetro del micropilote.
 - o Inyección repetitiva y selectiva (IRS), se realizan varias reinyecciones a través de tubería conocida comúnmente como "tubos-manguitos", y se realiza la inyección metro a metro a lo largo del elemento buscando que la lechada quede alrededor de todo el elemento.

4.1.1 Principales aplicaciones

Los micropilotes, a pesar de que no se usan frecuentemente, son de gran practicidad debido a su rapidez constructiva y a sus numerosas aplicaciones, según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.8), las aplicaciones más usuales de los micropilotes son las siguientes:

- a. **Estructuras de cimentación:** este es su uso más común, pueden emplearse en obras nuevas, en obras de expansión o repotenciación, reparaciones de obras ya existentes.
 - o **Obras nuevas:** se usan comúnmente en sistemas de cimentaciones combinados, ya sea con zapatas y vigas de conexión o losa de cimentación, tienen gran éxito cuando los espacios de trabajo son reducidos, las condiciones de acceso son complejas, cuando los terrenos presentan gran variabilidad, es decir, que presentan intercalaciones de niveles rocosos; los micropilotes transmiten las cargas de manera más uniforme y menos concentradas que los pilotes, esto es de gran ventaja.
 - o **Obras existentes:** se pueden usar en reparaciones de obras ya existentes, reforzamiento estructural u obras de ampliación en las que las solicitaciones estructurales se incrementen.

- b. **Estructuras de contención:** se construyen para el sostenimiento de masas de tierra cuando se van a ejecutar cortes, en este caso se realizan numerosos grupos de micropilotes de manera alineada con varias inclinaciones debido a que en este caso los esfuerzos cortantes y momentos flectores son altos y para estas

solicitaciones tienen mejor comportamiento los micropilotes inclinados; se debe realizar una viga cabezal que agrupe todos los micropilotes construidos garantizando que estos trabajen de manera conjunta

- c. Estabilización de taludes o laderas:** guarda mucha similitud con el uso expuesto anteriormente, se realizan micropilotes en forma de abanico y se realiza una viga que agrupe todos los micropilotes, dicha estructura puede llevar otros elementos, como anclajes u otras unidades de obra. Estas intervenciones mejoran considerablemente los factores de seguridad debido a que aumenta la resistencia al corte y al deslizamiento. Estas obras se prefieren sobre otras en este caso, según las dimensiones de la masa inestable o la potencial superficie de rotura, la facilidad de acceso para la maquinaria y el espacio para la ubicación de esta, la urgencia que implique el proceso de inestabilidad, entre otras razones que evalúa particularmente quien elabore los diseños.

En cuanto a el diseño, la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005), recomienda que sea un abanico con al menos dos inclinaciones distintas, se debe incluir en el diseño el elemento que garantice que los micropilotes realicen el trabajo conjunto; para el cálculo de los esfuerzos sobre los micropilotes y el análisis de estabilidad se recomienda emplear teoría de elementos finitos, que suponen los micropilotes y el terreno del entorno como un muro equivalente. Recomienda además que la sección transversal de la armadura no sea menos de 10cm^2 y que el micropilote tenga una longitud mínima de 5m por debajo de la potencial superficie de rotura.

- d. Mejora del terreno:** esta aplicación es común cuando el suelo es poco competente, por lo tanto, se busca una mejora en su capacidad de soporte global de manera que los asentamientos presentados en la estructura final estén dentro de un rango aceptable según lo exija la norma sismorresistente de 2010 - NSR10; en este caso, se puede emplear una retícula de micropilotes próximos entre sí, preferiblemente inclinados y entrecruzados. Para estas mejoras de terreno, se prefieren los micropilotes que llevan inyección tipo IR ó IRS debido a la inyección de lechada que se realiza a presión, pues esta consigue una mejora en las propiedades mecánicas del suelo alrededor de los micropilotes ejecutados.

4.1.2 Aspectos de diseño

En Colombia, estos elementos no se encuentran dentro de la Norma Sismoresistente de 2010, la cual regula los aspectos que deben cumplir las construcciones de manera que su respuesta estructural sea adecuada en caso de sismo; por ello se buscó apoyo en normas existentes en otros países. Según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.19), las comprobaciones que deben realizarse de manera que el diseño sea estable, son las siguientes:

- Estados límites últimos
 - o Fallo de estabilidad global
 - o Fallo de capacidad de soporte de terreno
 - o Fallo estructural
 - o Socavación del cimiento
- Estados límites de servicio
- Otras comprobaciones

Estados límites últimos: ocurre cuando la estructura falla llegando al colapso. Se realizan las siguientes comprobaciones:

Fallo de estabilidad global: se suponen varias superficies de falla que abarquen toda el área de análisis, y se analiza su estabilidad a partir de métodos de cálculo de equilibrio límite

Fallo de capacidad de soporte del terreno: se da cuando el que falla es el terreno sobre el que está construida la cimentación, se da de los siguientes modos:

- Hundimiento: cuando la capacidad de soporte del terreno es inferior a la carga (de compresión) que transmite el micropilote al terreno.
- Arranque: cuando en micropilotes sometidos a esfuerzos de tracción se alcanza el agotamiento por esfuerzo rasante en el fuste.
- Rotura horizontal del terreno: Cuando en micropilotes de eje aproximadamente vertical, las presiones horizontales agotan la capacidad del terreno.

Fallo estructural: debe analizarse los siguientes modos de fallo:

- Fallo estructural de los micropilotes: cuando los esfuerzos transmitidos superan la resistencia del micropilote como elemento estructural
- Fallo de conexión con la estructura: cuando los esfuerzos transmitidos superan la resistencia de la conexión entre el micropilote y la estructura de cimentación de la que forma parte, o el encepado que une sus cabezas, según el caso.

Estado límite de servicio: no implica la falla de la cimentación, pero si una pérdida de serviciabilidad ya sea por estética o porque se limita su funcionamiento.

El asentamiento que tengan los micropilotes puede considerarse un estado límite de servicio, sin embargo, pueden originar un estado límite último por daños en la estructura soportada.

Comprobaciones adicionales: En determinadas circunstancias serán necesarias otras comprobaciones adicionales entre las que puede citarse:

- Estabilidad de los taludes de las excavaciones y plataformas realizadas por construir los micropilotes
- Expansividad del terreno, que puede provocar cierto levantamiento de la cimentación
- Problemas de colapsabilidad en suelos
- Ataque químico del terreno, del terreno o de las aguas, a los micropilotes
- Posible contaminación debida a materiales que se utilicen e la perforación
- Posibles efectos sísmicos y en particular la licuación de terreno en el entorno del cimiento
- Erosión localizada por escorrentía
- Cualquier otro fenómeno ligado a condiciones especiales de cimentación de las obras a tratar.

Los esfuerzos más importantes y los modos de falla a considerar en el cálculo de los micropilote, en la mayoría de los casos, son:

- a. En estructuras de cimentación, tanto en obras nuevas como de refuerzo de estructuras preexistentes, en general los micropilotes se deberá proyectar para que trabajen sometidos a esfuerzos axiales, fundamentalmente de compresión y en ocasiones de tracción. Cuando la cimentación esté sometida a esfuerzos horizontales significativos, se podrán disponer micropilotes inclinados para absorber la componente horizontal de la carga, o parte de la misma.

Los modos de falla más típicos en esta aplicación son los de:

- Hundimiento
- Arranque
- Rotura del terreno por esfuerzos horizontales
- Fallo estructural de los micropilotes
- Fallo de la conexión con la estructura

- b. En estructuras de contención o sostenimiento del terreno los micropilotes estarían sometidos fundamentalmente a esfuerzos de flexión, cortante y, según su disposición, a esfuerzos de tracción y compresión.

Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:

- Fallo de estabilidad global
- Fallo estructural de los micropilotes
- Fallo de la conexión con el encepado

- c. En estabilización de terrenos los esfuerzos transmitidos a los micropilotes serán fundamentalmente de cortante y flexión.

Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:

- Fallo de estabilidad global
- Fallo estructural de los micropilotes
- Fallo de la conexión con el encepado

- d. En aplicaciones de mejora del terreno, los esfuerzos transmitidos a los micropilotes son básicamente de compresión

Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:

- o Hundimiento
- o Fallo estructural de los micropilotes

4.1.3 Pruebas de carga

Las pruebas de carga se realizan debido a la gran incertidumbre en las condiciones particulares del terreno, para verificar que los procedimientos constructivos fueron correctos y que los elementos están trabajando adecuadamente de acuerdo con el diseño, entran entonces a ser una garantía de funcionamiento. Para la realización de estas pruebas puede realizarse un micropilote extra bajo las mismas condiciones y mismo terreno que los demás elementos, también se puede considerar la realización de estas sobre algún micropilote que haga parte de la estructura, en este caso, no se alcanzaría la carga de hundimiento, sin embargo, puede definirse con una alta precisión la deformabilidad de la cimentación. [1] Los ensayos de carga vertical que deben provocar el hundimiento del elemento para proporcionar parámetros más certeros a cerca de la resistencia última y un mejor esquema del elemento, proporcionan una reacción vertical elevada, por lo que deben ser ejecutados en un elemento dispuesto para tal fin y no uno que haga parte de la estructura.

Las pruebas de carga suelen clasificarse en función del esfuerzo aplicado, ya sea de compresión, tracción, o carga lateral, y del valor que este alcance en la prueba con relación a la capacidad última del micropilote, siendo posible que llegue hasta la rotura. Las pruebas de carga pueden realizarse con el fin de verificar la idoneidad de los micropilotes ya construidos o para investigaciones de las propiedades resistentes del conjunto micropilote-terreno.

La Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento, 2005, P.75, recomienda que el número de pruebas de carga de investigación este en torno al 1% de los micropilotes proyectados, y el número de pruebas de carga de idoneidad entre el 2% y 4% de los micropilotes ejecutados en la obra dependiendo las características de esta, el número total de micropilotes y la variabilidad del terreno.

4.1.4 Grupo de micropilotes

Es común encontrar que las cimentaciones se apoyan sobre varios micropilotes, esto es debido a que los micropilotes tienen un desempeño superior cuando trabajan en grupo, pues brindan un mejor soporte en casos eventuales de carga excéntrica.

En estos casos se consideran grupos de micropilotes, pueden incluir micropilotes inclinados, esto varía según el diseño y las necesidades puntuales de cada proyecto.

“El estado de los conocimientos y de la literatura técnica sobre los grupos de micropilotes resulta, por el momento, menos completo que la correspondiente a grupos de micropilotes, motivo por el cual, suele resultar habitual la consideración del problema desde planteamientos muy similares en ambos casos.” (Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento, 2005, P.45),

4.2 Anclajes

4.2.1 Aspectos generales:

Los anclajes son elementos empleados para estabilización de taludes, ideales debido a que ocupan poco espacio, y pueden emplearse en taludes de hasta 90 grados y de grandes alturas.

De acuerdo a la Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno del ministerio de fomento (2001), (P.11), Los anclajes se clasifican en activos o pasivos, según el nivel de carga inicial que se les aplica; a los primeros se les realiza un tensionamiento después de su ejecución, mientras que a los segundos, se les deja con una carga inicial baja que adquieren normalmente por los movimientos de la estructura.

Los anclajes también tienen una clasificación y uso según el tipo de inyección, similar los micropilotes. Los anclajes pasivos típicamente tienen un sistema de inyección única global, este tipo de anclajes funcionan muy bien en taludes con rocas, terrenos cohesivos que posean buenos parámetros de resistencia y en suelos granulares; los anclajes pasivos que se emplean con inyección repetitiva o repetitiva selectiva suelen ser menos comunes, sin embargo, funcionan muy bien para taludes en roca fisurada blanda, aluviales granulares, gruesos y finos, en suelos con predominio de finos y consistencias bajas.

Los anclajes activos son preferibles en terrenos que puedan sufrir movimientos, para evitar una rigidez excesiva en la cabeza que pueda llegar a su rotura, y cuando hay que absorber acciones que requieran gran capacidad, la reinyección tiene como objetivo que la capacidad del anclaje sea mayor en la zona del bulbo.

Según la Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno del ministerio de fomento (2001), (P.23) En las estructuras ancladas se deberán tener en cuenta dos aspectos:

- La estabilidad global de la zona en que se encuentra la estructura anclada.
- El comportamiento de cada uno de los elementos de los anclajes y sus efectos sobre el entorno más inmediato de los mismos (equilibrio local).

EQUILIBRIO GLOBAL: Lo referente al equilibrio o estabilidad global se toma igual que en el caso de los micropilotes.

EQUILIBRIO LOCAL: Para garantizar que cada componente del anclaje tenga un comportamiento adecuado, se debe considerar lo siguiente:

- La rotura parcial de la cabeza del anclaje o de la estructura a anclar, por exceso de tensión en los anclajes, o por fallo de alguno de estos últimos.
- La rotura del tirante a tracción y el deslizamiento del mismo dentro del bulbo.
- La pérdida de tensión en el anclaje por deslizamiento del bulbo contra el terreno.

4.2.2 Operaciones

La ejecución de los anclajes comporta las siguientes operaciones:

- a) Fabricación, transporte y almacenamiento de los tirantes.
- b) Perforación
- c) Instalación de la armadura.
- d) Inyección del anclaje.
- e) Tensado del anclaje (solo para anclajes activos). [2]

4.2.3 Tensado del anclaje

Después de que se culmina la inyección y se construye el dado del anclaje, se procede al tensionamiento de los cables, esta es el último paso que garantiza la estabilidad del talud. Cuando se desea realizar ensayos en el anclaje, el tensado se realiza traccionando todos los cables simultáneamente.

Según la Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno del ministerio de fomento (2001), (P.35)El tensado del anclaje debe realizarse por personal capacitado, que posea experiencia en este tipo de labores, y es preferible si se realiza en una sola operación. Se procurará que el orden de tesado de los anclajes sea tal que se vayan poniendo en carga de forma alterna, para evitar la concentración excesiva de carga. Se debe considerar la resistencia del dado, viga o la estructura que sea el caso pues se debe evitar que se produzcan esfuerzos de flexión como consecuencia de la aplicación de cargas concentradas excesivas, fundamentalmente en el caso de anclajes de alta carga nominal.

Por esto, la misma guía mencionada anteriormente recomienda que el dado o viga de reparto o la propia estructura a anclar no debe experimentar, con las cargas nominales concentradas, distorsiones angulares superiores a $1/750$. En caso de no cumplirse esta condición se podrá iniciar el proceso de entrada en carga por fases, aplicando en cada una de ellas, a todos los anclajes, fracciones de la máxima a alcanzar.

4.3 Proceso constructivo

La ejecución de los micropilotes y anclajes comprende normalmente la realización de las siguientes actividades:

- Perforación del micropilote o anclaje
- Instalación de la armadura
- Inyección del micropilote o anclaje

— En el caso de los anclajes activos, se realiza un paso final que consta de un tensionamiento.

4.3.1 Perforación

La actividad de perforación es la primera en ejecutarse, para esto deben tenerse en cuenta varias consideraciones. Primeramente, se debe tener conocimiento del tipo de suelo a tratar, este conocimiento es fundamental ya que de acuerdo con esto se escoge la maquinaria que se empleara, así como los cabezales usados y el fluido de barrido para la perforación, se utilizan máquinas de rotación o roto-percusión, de dimensiones adecuadas según las necesidades de cada obra.

Las perforaciones deben ejecutarse según las indicaciones dadas en los planos de cada proyecto, se deben respetar las inclinaciones, longitudes y diámetros allí pactados, es importante tener en cuenta el recubrimiento mínimo que requiere cada elemento para proteger la armadura de la corrosión. En el desarrollo de este proceso, se puede tener varios grados de error de acuerdo a la experiencia del operador, el espacio de trabajo, la maquinaria empleada, etc. Según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.59), se deben tener en cuenta los siguientes cuidados con respecto a los posibles errores y tolerancias que se dan en la ejecución de esta actividad.

— La posición del eje de la boca de la perforación no deberá estar desplazado más de cincuenta milímetros (50 mm) respecto de su posición teórica. Esta verificación (comprobación del replanteo) debería realizarse en todas las perforaciones.

— Respecto al diámetro nominal de la perforación, previsto en el proyecto, su posible reducción, fundamentalmente debida al desgaste de los útiles de perforación, deberá ser inferior o igual a dos milímetros ($\Delta D < 2 \text{ mm}$), a comprobar midiendo dichos útiles con calibre. Se verificará cada vez que se cambie el útil de perforación o cuando se observe un desgaste apreciable y en todo caso, en al menos un cinco por ciento (5%) de los micropilotes que se ejecuten.

— La longitud de la perforación no debe diferir en más de veinte centímetros ($\Delta L < 20 \text{ cm}$) de la indicada en el proyecto, a comprobar midiendo, incluso con cinta métrica, la longitud total de los útiles de perforación empleados. Esta verificación se efectuará en al menos un veinte por ciento (20%) de las perforaciones.

— Respecto a la inclinación de la perforación, no se deberá desviar más de dos grados sexagesimales ($\Delta i < 2^\circ$) respecto de la teórica, comprobándose con inclinómetro o escuadra con doble graduación en milímetros. Se efectuará en al menos un cinco por ciento (5%) de las perforaciones.

4.3.1.1 Sistemas de perforación

Teniendo en cuenta el tipo de suelo donde se ejecutaran las perforaciones, se debe elegir el proceso constructivo que sea menos invasivo de manera que no afecte la zona de construcción ni estructuras aledañas, por ello, se debe analizar previamente que fluido de perforación se empleara para el barrido de la perforación y la presión, con el fin de contrarrestar los desmoronamientos bruscos en la perforación que se dan, durante el retiro de la tubería de perforación o durante la instalación de la armadura, el proceso constructivo debe permitir que sea notoria cualquier variación en el terreno que contradigan las especificaciones del proyecto.

Se debe considerar el efecto del agua según el tipo de suelo a tratar, cuando este sea el fluido de perforación para determinar si es necesario encamisado para la perforación, ya sea tubería metálica recuperable o no recuperable o fluidos como bentonita o polímeros, estos elementos son necesarios siempre cuando se traten suelos no cohesivos, cuando se traten suelos blandos, cársticos o colapsables se debe emplear entubación provisional, si se sospecha de la existencia de cavernas o huecos se recomienda dejar entubación permanente. Si los trabajos forman parte de obras de reforzamiento, o en el caso de suelos susceptibles al agua, resulta fundamental el empleo de aire en lugar de agua, ya que la utilización de esta como fluido de perforación puede ser contraproducente.

Según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.61), los sistemas de perforación son:

— **Perforación a rotación:** consiste en provocar la rotura del terreno, o los materiales a perforar (en el caso de cimentaciones preexistentes), por la fricción generada en la rotación del útil de perforación.

Resulta especialmente recomendable para atravesar cimentaciones antiguas al provocar, en general, menores vibraciones que la

rotopercusión. En general se efectúa con la batería usual de sondeos, con barrenas helicoidales o tricono.

— **Perforación a rotopercusión:** consiste en provocar la trituración de los materiales a perforar, por fricción y percusión de manera conjunta. Se emplean para ello, martillos de fondo o en cabeza.

La maquinaria de perforación, debe contar con sistemas de recuperación de polvo cuando se trabaje en seco y especialmente cuando se haga en roca.

A continuación, se describen los cabezales empleados para la perforación:

Mano de ángel: este cabezal es usado para perforar en suelo blando o suelos de consistencia dura pero sin contenido de roca, se puede emplear con agua o aire a presión como fluidos de perforación.

Martillo de fondo: Este martillo realiza la perforación en la roca y suelos muy duros por roro-percusión, ya que este va rotando y a su vez percutiendo para ir penetrando en la roca o suelo. Solo se puede emplear con aire a presión como fluido de perforación

Auger: Este elemento tiene una forma de espiral, que al rotar se va introduciendo en el suelo y al ser sacado de la perforación saca el material sobrante de esta, no requiere fluido de perforación, pero si se agrega agua por gravedad, facilita la limpieza del pozo debido a que el suelo se vuelve más cohesivo y se adhiere con mayor facilidad para ser evacuado.

Implementos especiales: guaya anti-látigo para las mangueras que conducen el fluido de perforación hasta la maquinaria, ya que estos fluidos van a altas presiones y de reventarse pueden ocasionar un accidente al personal, manguera de perforación preferiblemente de alma de acero para que no se reviente debido a las presiones manejadas, inclinómetro y nivel de mano para tener precisión con la inclinación de la perforación.

La maquinaria empleada para perforaciones en terrenos horizontales son perforadoras de oruga, cuando se trata de perforaciones en taludes se emplean brazos de perforación los cuales se suspenden en el talud, ubicándose en el punto que se requiere, y se envían los mandos a través de la unidad hidráulica operada por el personal de perforación.

4.3.1.2 Fluido de perforación

El fluido de perforación empleado dependerá de las condiciones del suelo a tratar; tiene como función limpiar la perforación expulsando de esta el material suelto que queda como residuo, de manera que este no quede generando obstrucciones.

Se pueden emplear tres opciones, la primera es realizar las perforaciones con auger, este elemento no requiere fluido de perforación, debido a que por la configuración que tiene en espiral, saca material sobrante de la perforación dejándola limpia, este método tiene una restricción muy importante, solo puede emplearse en materiales relativamente blandos y libres de roca, además, entre más ancha sea la perforación más se dificulta la actividad, debido que es más cantidad de suelo por limpiar y se debe sacar el auger constantemente para limpiar el material residual y volver a introducirlo hasta alcanzar la profundidad de la perforación deseada, se recomienda agregar agua al pozo para facilitar la limpieza de la perforación.

La segunda opción es el agua, esta es impulsada desde los tanques de almacenamiento hasta la perforación, por medio de una bomba; el agua retorna por la boca de la perforación evacuando el lodo que queda dentro de esta. Cuando se trabaja en suelos susceptibles a cambios volumétricos por cambios en la humedad, o se tienen problemas de estabilidad por inconvenientes con los regímenes de agua, se debe considerar muy bien si este fluido de perforación es el indicado, además este no permite perforar en roca. Cuando se emplea este tipo de fluido los rendimientos se reducen debido a que se deben ejecutar más actividades y se debe tener mayor cuidado. Se debe realizar un pozo para la recirculación del agua y se debe buscar que el agua después de evacuar de la perforación se conduzca a este, de allí la bomba estará succionando el agua para enviarla hasta la perforación para realizar la limpieza de esta; cuando no se puede recircular el agua debido a que no hay forma posible de elaborar los pozos de recirculación se debe tener un lugar donde conducir las aguas para que estas sea desechadas, debido a que es una gran cantidad de agua y esta sale mezclada con el lodo de la perforación, por lo que sería ideal permitir que esta se asentara un poco antes de llegar al sitio de disposición final para no tener inconvenientes con tuberías tapadas por sedimentación, tampoco pueden dirigirse hasta afluentes de agua sin tratarse antes, debido a que, por la cantidad de lodo, puede causar afectaciones ambientales.

La opción restante, es el aire a presión el cual se obtiene a través de un compresor de aire, es el único fluido que permite la perforación en roca, debido a que es el único fluido con el que el martillo percute para realizar la perforación. Cuando se realizan las perforaciones con aire, se obtienen mejores rendimientos ya que estas pueden ejecutarse más rápido, no se requiere ningún tipo de obra extra y además, se puede perforar con cualquier tipo de cabezal. Sin embargo, es el fluido de perforación que más costoso resulta debido a los consumos de combustible del compresor empleado. La presión del aire debe ser tal, que pueda realizar un buen barrido de la perforación, es decir, debe ser capaz de elevar el material suelto de la perforación fuera de esta; cuando son suelos con altos contenidos de humedad que se hacen demasiado pesados, las presiones deben ser altas debido a que el suelo pesa más.

4.3.1.3 Especificación

Cuando se construyan micropilotes y/o anclajes y se encuentren estructuras aledañas o condiciones de estabilidad complejas que comprometan la seguridad del personal que ejecute las labores, se vuelve recomendable realizar un monitoreo permanente a los movimientos presentados en el terreno durante las intervenciones, ya sea con la instalación de inclinómetros o mediciones diarias por parte de la comisión de topografía, de manera que puedan medirse asentamientos presentados, o levantamientos contemplados durante un periodo de tiempo según la duración de las actividades, este control se realiza mediante nivelación de precisión, con referencias en puntos prefijados fuera de la zona susceptible de afectación. Es recomendable que en el proyecto estimen los movimientos esperados en las estructuras vecinas y que contemple los procedimientos constructivos donde definan el sistema de perforación y fluido a emplear, la secuencia constructiva a seguir especificando el orden de ejecución y los tiempos de espera para observar posibles cambios, no es recomendable perforar dos micropilotes adyacentes de manera consecutiva, se recomienda, en la medida de lo posible, perforar micropilotes intermedios. [2] (Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.62))

4.3.1.4 Colocación de la armadura

La Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.63) recomienda el siguiente procedimiento para la colocación de la armadura:

Previo a la instalación de la armadura, es pertinente revisar que la perforación quedó limpia y libre de obstáculos, también se debe revisar los traslapes en la armadura en caso de que posea; el refuerzo debe ser instalado en el menor tiempo posible.

La instalación de la armadura se debe realizar sin alterar la posición de ninguno de sus elementos (centradores, manguitos, etc.).

Se empleará el número de centradores necesario para garantizar la correcta colocación de la armadura y asegurar el recubrimiento mínimo frente a la corrosión, disponiéndose de modo tal, que no impidan el correcto proceso de inyección. Salvo justificación expresa en otro sentido, se colocarán al menos cada tres metros (3 m) de longitud de la armadura. En cualquier caso, e independientemente de la longitud del elemento, el número mínimo de secciones transversales en que se instalen centradores será de dos (2). Se recomienda que la armadura quede a una distancia mínima de diez centímetros (10 cm) del fondo de la perforación, garantizando un recubrimiento total a la armadura, de manera que quede protegida de la corrosión.

Durante la manipulación y colocación de la armadura se tendrá especial cuidado en no deformarlos, ni dañar sus componentes, ni la protección anticorrosión. Antes de su instalación se comprobará visualmente su integridad. La colocación se efectuará de forma controlada para no alterar la posición de ningún elemento. La Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.63)

4.3.2 Inyección

4.3.2.1 Consideraciones generales

Después de que se termina la perforación es recomendable no dejar pasar mucho tiempo para inicial las labores de inyección. Según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento (2005) (P.63), la inyección de lechada tiene los siguientes objetivos fundamentales:

- Conformar el fuste y la punta del micropilote de manera que se materialice el contacto con las paredes de la perforación.
- Proteger a la armadura de la corrosión.

Los parámetros de inyección (presión, caudal, etc.) se deben definir en el diseño, y en todo caso en el procedimiento constructivo. El tiempo transcurrido entre la perforación, instalación de la armadura e inyección debe ser el menor posible, debiéndose establecer de forma expresa en el proyecto y en todo caso en el protocolo de ejecución, según las características del terreno y de las obras a realizar. Se recomienda que en ningún caso este tiempo sea superior a veinticuatro horas (24 h).

4.3.2.2 Lechadas de cemento

Las lechadas de cemento que se emplean para la inyección de micropilotes y anclajes tienen como función, además de dar un soporte estructural, proteger la armadura del elemento contra la corrosión, es recomendable una dosificación agua/cemento (a/c) comprendida entre 0,4 y 0,6.

Es posible utilizar aditivos para mejorar la fluidez de la lechada, para reducir el agua libre y la retracción. No deben contener más de un 0,1% en peso de cloruros, sulfatos o nitratos. Si fuera necesario, y para limitar las pérdidas en la perforación, se podrá incorporar arena a las lechadas de cemento. En este caso debe ensayarse previamente la mezcla para estudiar su inyectabilidad. [2]

4.3.2.3 Tipos de inyección

Se diferencian tres tipos de inyección, (IU, IR, IRS) y un cuarto tipo de inyecciones, se conoce como inyección previa, esta se define más adelante.

Según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento, 2005, P.64), se describen a continuación cada uno de los tipos de inyección referidos:

a) Inyección previa: cuando las pérdidas de inyección se prevean elevadas, entendiéndose normalmente como tales cuando sean superiores a dos veces y media o tres veces el volumen teórico de inyección, se realizará una inyección previa con lechada o mortero de cemento, que será necesario reperfurar para proseguir con la ejecución de la perforación. Antes de procederse a la inyección o reinyecciones se debe analizar lo reflejado en el parte de perforación y observado durante la misma, efectuando en caso necesario una inyección previa.

En el análisis de la perforación se tendrá en cuenta la magnitud de las pérdidas de fluido detectadas y sus posibles causas. Se puede efectuar una prueba de inyección de agua bajo carga variable en rocas, una

prueba de pérdida de lechada sin presión (rellenando continuamente la perforación), o inyecciones a presión (midiendo las pérdidas en la zona de bulbo, con obturadores y tubos manguito). La inyección previa se efectúa relleno toda la perforación con una lechada o mortero de cemento. Puede que haya de realizarse varias veces, en función de la permeabilidad del terreno. Después de cada inyección se comprobará el estado de la perforación. [2]

b) Inyección única global (IU): efectuada en una sola fase, rellena el hueco comprendido entre la perforación y la armadura, así como el interior de ésta.

La inyección se debe realizar desde la punta a la cabeza del elemento, pudiéndose efectuar de la siguiente manera:

— Mediante inyección a través de un tubo, generalmente de plástico, colocado a lo largo de la armadura, produciéndose el ascenso de la lechada a lo largo de la perforación. En este caso, y debido al pequeño diámetro de los tubos de plástico empleados, sólo se puede inyectar lechada.

En algunos casos, si transcurrido cierto tiempo (sin alcanzar el fraguado) se observa que disminuye el nivel de la lechada, por penetración de ésta en el terreno, puede ser necesario volver a inyectar.

En los micropilotes tipo IU la presión de inyección normalmente será superior a la mitad de la presión límite del terreno e inferior a dicha presión límite:

La presión límite del terreno será la obtenida preferiblemente en el ensayo presiométrico, o en su defecto por correlación con otros ensayos o parámetros del suelo.

La presión de inyección se podrá medir a la salida de la bomba, siempre que la boca de la perforación no se encuentre a una distancia superior a cincuenta metros (50 m) en planta, ni a un desnivel mayor de un metro (1 m). En caso contrario, se medirá en boca de la perforación. [1]

c) Inyección repetitiva (IR): En estos elementos el relleno e inyección se realiza en dos fases:

— En primer lugar, y una vez introducida la armadura, se realiza un relleno de la perforación con lechada en la forma ya descrita para los micropilotes del tipo IU.

— Posteriormente se realiza la reinyección, de alguno de los siguientes modos:

- Mediante un tubo o circuito con válvulas antirretorno de efecto simultáneo, colocado en el espacio entre el terreno y la armadura y que debe limpiarse para permitir una inyección posterior.
- Mediante conductos (en general, de plástico) de distinta longitud que lleguen a diferentes cotas del micropilote, colocados por el exterior de la armadura, a través de los cuáles se inyecta la lechada.

Al final de la última fase de inyección, la presión en la boca de la perforación deberá cumplir los mismos criterios que se han especificado para las inyecciones del tipo IU. Acabado el proceso se realizará una inyección final de relleno de la armadura tubular. [1]

d) **Inyección repetitiva (IRS):** Realizada mediante inyección a presión de la perforación, con doble obturador, a través de manguitos instalados en la tubería. La distancia entre cada dos manguitos consecutivos deberá ser como máximo de un metro (1 m).

Previamente, la corona anular entre la tubería y la pared de la perforación debe rellenarse con una lechada (inyección de sellado) que sirva de cierre, e impida a la inyección a presión escapar hacia la superficie.

Se puede inyectar más de dos veces a través de aquellos manguitos que se desee en función, normalmente, de la admisión de lechada obtenida.

La presión de inyección será normalmente algo superior a la presión límite del terreno, que deberá obtenerse del ensayo presiométrico o, en su defecto, por correlación con otros ensayos o parámetros del suelo.

Acabado el proceso se realizará una inyección final de relleno de la armadura tubular. [1]

4.3.2.4 Maquinaria de inyección

La maquinaria empleada para esta actividad, según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento, 2005, P.66), es la siguiente:

El equipo para la ejecución de la inyección estará constituido al menos por una mezcladora, un agitador y una bomba de inyección.

— La mezcladora deberá ser de alta turbulencia, de forma que se garantice la calidad y homogeneidad de la mezcla obtenida.

— El agitador sirve como depósito de acumulación entre la mezcladora y la bomba de inyección, para garantizar la continuidad de inyección. Mediante unas aspas que giran lentamente se homogeneiza la lechada o mortero durante su permanencia en el depósito, evitando así la formación de burbujas de aire. Deberá disponer de un sistema para controlar la admisión en cada fase.

— La bomba de inyección, hidráulica o neumática, es la encargada de impulsar la mezcla durante la inyección, proporcionando los caudales y presiones especificados en el proyecto. Irá provista de un manómetro para medir la presión.

4.3.2.5 Elementos inclinados

Los elementos inclinados tienen más dificultad que los elementos verticales, debido a que pueden derrumbarse con mayor facilidad. Según la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera del Ministerio de fomento, 2005, P.68), los problemas asociados al proceso de perforación inclinada son los siguientes:

- Mayor facilidad para que se produzca la inestabilidad de las paredes de la perforación, respecto del caso de eje vertical.
- Aumento, por lo general, de la desviación de la perforación respecto a su eje teórico, conforme lo hace la inclinación de ésta.
- Mayores dificultades para el emboquille de la perforación en el caso de recalces o refuerzo de estructuras existentes y mayores necesidades de espacio libre debido a la inclinación del mástil de perforación.

— Flexión inducida por el peso del terreno sobre el micropilote.

4.3.3 Ensayos de suelos útiles

Dentro de los ensayos que se realizan en el estudio de suelos, ninguno es ilustrativo para la etapa del proceso constructivo de micropilotes y anclajes, por lo que la actividad se desarrolla bajo muchas

incertidumbres, y queda solo estar atento al desarrollo diario de las perforaciones e inyección. Por ello se definen los siguientes ensayos que son más ilustrativos y pueden brindar información más precisa para el desarrollo de las actividades

4.3.3.1 Presiómetro

Este ensayo consiste en realizar una perforación para aplicarle una presión radial la cual se incrementa constantemente, con el fin de obtener datos acerca de la variación de volumen o deformaciones volumétricas y la presión necesaria para lograr cierta deformación, esto se realiza a través de una sonda y se toman los datos del volumen inyectado. Este ensayo cobra importancia para el proceso constructivo, ya que puede medirse las presiones necesarias que deben aplicarse al suelo para provocar deformaciones y agrietamientos y en base a eso manejar las presiones para los fluidos de perforación. [3]

4.3.3.2 Permeabilidad

Este ensayo consiste en medir la facilidad con la que el agua penetra el suelo; se trata de rellenar de agua la muestra que vaya a emplearse y se mide la velocidad de descenso del nivel del agua, esto puede ejecutarse en alguna perforación ejecutada, se llena de agua y se mide el tiempo que tarda en descender el agua hasta cierto nivel, esto puede darnos indicios de que tanta lechada puede irse por las grietas para considerar los consumos de cemento. [4]

4.3.3.3 Línea sísmica

Este ensayo hace parte de los métodos geofísicos, consiste en conectar geófonos al suelo que medirán las ondas de sonido ocasionadas, para que los resultados sean confiables se debe garantizar el mínimo de ruido posible durante la ejecución del ensayo. Este ensayo permite diferenciar los diferentes estratos, así como el nivel de dureza, basado en la propagación de las ondas acústicas en el suelo. Basado en la información obtenida a través de este ensayo, se puede saber que tan compacto está el suelo a medida que va aumentando la profundidad con la intención de escoger adecuadamente los métodos de perforación y los protocolos. [5]

5 Metodología

- Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva con el fin de conocer la información existente respecto al procedimiento constructivo para micropilotes y anclajes, así como guías, normas,

etc. Dicha revisión busco inicialmente depurar la información existente dentro del país, ya que sería ideal que estuviera enfocado en la topografía y geología local, sin embargo no se tuvo éxito, por lo que se procedió a realizar la consulta a nivel internacional ya que hay países que cuentan con una mayor documentación al respecto, pues utilizan este tipo de elementos más frecuentemente que en Colombia, en dicha revisión se encontraron guías españolas donde amplían el tema de manera clara y estructuran los protocolos para los procesos constructivos, además del sistema de funcionamiento, sin embargo, no se catalogan ni riesgos ni problemáticas presentadas. Estas guías se usaron para obtener un conocimiento inicial a cerca de los procesos constructivos, así como una comparación de lo allí descrito con lo ejecutado en obra.

- Se recopiló información con los operadores a cerca de la maquinaria que operan, buscando identificar las problemáticas que se presentan más a menudo y que afectan directamente los rendimientos. Dichas problemáticas son ocasionadas frecuentemente cuando se trabajan en terrenos inestables, o en terrenos con alto contenido de humedad; de acuerdo con la información proporcionada por el personal, el principal inconveniente se da cuando las perforaciones se derrumban, ya sea porque no se realizó un buen barrido de la perforación o porque el suelo como tal presenta dificultades, cuando esto sucede es necesario realizar nuevamente la perforación.
- Se realizó una identificación de los tipos de suelo que se encuentran en toda la obra, y se diferencian por estratos y por localización, dicha identificación se apoyó en la observación de los cortes realizados, así como algunas condiciones particulares que pueden inferirse basado en el suelo que sale de la perforación y la respuesta del suelo en la etapa de inyección. Los suelos tratados son depósitos, estos suelos consisten en antiguos deslizamientos que ocurrieron en la zona y se depositaron en la parte de menor pendiente, estos tipos de suelos se encuentran típicamente en condiciones topográficas complejas con pendientes elevadas, debido a que son arrastrados por tramos largos y se mezclan varios materiales, entonces se conforma por roca envuelta en una matriz de suelo arcilloso de consistencia bastante blanda con un grado alto de humedad, se encuentran rocas en alto estado de meteorización y bolas de roca de gran dureza; también se realizaron perforaciones en llenos diseñados conformados por limo. El terreno en general poseía bastantes

grietas debido a los procesos de retracción y a que se trabajó sobre llenos mal ejecutados.

- Se identificó el tipo de maquinaria empleada para la realización de las perforaciones, con el fin de entender su funcionamiento, tanto la maquinaria de perforación como la maquinaria empleada para la limpieza de la perforación según el fluido que sea empleado para tal fin, es decir, agua o aire. Basado en la maquinaria empleada se catalogan ciertas dificultades, debido a que las maquinas tienen diferentes pesos y configuraciones que hacen que las complicaciones sean diferentes.
- Se hizo una revisión constante de los procesos constructivos ejecutados para la realización de micropilotes y anclajes a través de la observación continua de los procesos ejecutados en obra, con el fin de identificar las principales problemáticas presentadas, tanto sus causas, como la solución más pertinente según las condiciones de frontera. Esta fue la fase más importante, pues apporto la experiencia, y al conectar los sucesos ocurridos en obra, con los conocimientos adquiridos en el área de geotecnia en la universidad, se obtuvo una visión más amplia lo que permitió los resultados obtenidos
- Se evaluaron los riesgos existentes que genera la ejecución de los micropilotes y anclajes, tanto los riesgos que afectan la estabilidad del terreno, así como los riesgos ambientales y los riesgos a los que se someten los operadores mediante la ejecución de estas actividades, así como su impacto. Esto se desarrolló por medio de ensayo y error debido a que no se contaba con un documento organizado que estandarizara los procesos constructivos así como planes de contingencia en caso de que se presentaran dificultades, de esta manera, fue necesario proponer soluciones basadas en el conocimiento adquirido y emplearlas para ver la respuesta del terreno para conocer si eran pertinentes o era necesario realizar las cosas de una manera diferente. Se partió de esta experiencia para proponer varias recomendaciones que permiten que los procesos realizados sean más efectivos y menos riesgosos.

6 Resultados y análisis

Las diferencias entre micropilotes y anclajes ya fueron abordadas en el marco teórico, sin embargo, como los procesos constructivos difieren poco, se generaliza para ambos casos realizando la subdivisión por actividades: perforación e inyección, sin embargo cuando se encuentre una diferencia para cada caso se hará la especificación.

Inicialmente se aborda la perforación debido a que es la primera etapa constructiva, seguidamente se abordara la actividad de inyección, finalmente se darán algunas recomendaciones especiales.

6.1 Perforación

Para la realización de esta actividad, como ya se mencionó en el marco teórico, se debe tener una muy buena identificación geotécnica, pues según esta información se determina la manera de proceder, se debe conocer la dureza del terreno, cohesión, contenido de roca, tipo de suelo y grado de humedad; basado en esto se determina el fluido de perforación, si se requiere bentonita o polímero para el sostenimiento de la perforación y los cabezales requeridos para ejecutar la perforación, se debe conocer también el espacio de trabajo y el lugar específico de las perforaciones, basado en esto se determina el tipo de maquinaria empleada y los rendimientos esperados.

Para esta fase es muy importante contar con un documento estructurado que hable del tipo de suelo que se encontrara en la longitud de la perforación, las principales consideraciones que deben tenerse según esta información y un proceso constructivo lógico que permita trabajar de manera segura y eficaz, buscando que no deban realizarse reprocesos; en dicho documento es pertinente hablar acerca de:

- Los diámetros de perforación, pues muchas veces el diámetro recomendado por el diseñador no coincide exactamente con el diámetro de los cabezales de perforación que posee quien ejecuta.
- Verificaciones necesarias por realizar antes durante y después de la perforación, tales como inclinación, ubicación de la perforación y la limpieza de esta.
- Fluido de perforación empleado, así como la presión que no debe superar, principalmente en suelos blandos, agrietados, con problemas de estabilidad o en llenos.

- Tiempos de espera máximos entre perforación, instalación de la armadura, llenado e inyección.
- Orden de la perforación, pues si se perforan varios micropilotes adyacentes en un mismo dado, las perforaciones pueden perder estabilidad y derrumbarse internamente afectando así la etapa de inyección, para este punto y para la inyección ayuda que se presente un plano con los micropilotes enumerados de manera que se maneje la misma información por los diferentes entes.

Es pertinente que dentro de ese mismo documento se incluyan recomendaciones generales y un plan de contingencia que pueda emplearse en situaciones complejas que comprometan la estabilidad del terreno o la seguridad de los operadores.

Las principales dificultades que pueden presentarse son, inicialmente el acceso de la maquinaria y el espacio para estas operar, esta parte no es muy crítica, sin embargo, se debe manejar una buena logística para que no se presenten inconvenientes importantes, por ejemplo, si se trabaja sobre taludes, se debe considerar el peso de la maquinaria y la actividad que esta desempeñara ya que esto puede ocasionar problemas de estabilidad debido al peso aportado en la corona del talud y la vibración ocasionada por las labores de perforación.

En la obra que se realizaron las actividades, el proceso de perforación se hizo muy tedioso debido a que el fluido de perforación empleado en su mayoría, fue aire, y como el terreno presentaba tantas grietas, era común que este se perdiera a través de las grietas existentes, o incluso, que abriera grietas nuevas. Al perderse el aire a través de las grietas y no devolverse por la misma perforación, no es posible que limpie la perforación, cuando esto sucede es muy fácil evidenciarlo, debido a que en la boca de la perforación se debe sentir el aire saliendo y el polvo que evacua, en este caso es bueno estar monitoreando la superficie sobre la que se está realizando la perforación para observar las grietas por donde se está perdiendo el aire, es importante identificar si son grietas existentes o grietas que se están abriendo con el proceso de perforación, si es el segundo caso, es necesario evaluar la presión que se está manejando en el aire y la pertinencia del fluido de perforación empleado.

Por otro lado, cuando se realizaron las perforaciones con agua, también hubo procedimientos complejos debido a la improvisación con la que se ejecutaban las actividades por no contar con un documento guía, cuando se realizan perforaciones con agua, es necesario ubicar un pozo de recirculación y construir canales que permitan que el agua

evacuada de las perforaciones se encause nuevamente hasta este, para esto, el pozo debe estar en el punto de menor cota, para esto se debe contar con buen espacio, además se debe analizar que no sea contraproducente para el terreno debido a la infiltración de agua ya que el terreno permanecerá húmedo. Cuando esto no es posible, es decir, cuando no es posible recircular el agua para la perforación se debe tener un abastecimiento constante de agua para las perforaciones y se debe emplear entonces, un buen sistema de drenaje que permita que el agua que sale se encauce hasta su sitio de disposición final y si es posible, que antes de llegar a este, tenga un proceso de filtrado que permita el paso del agua pero no del lodo, para evitar taponamientos en tuberías por sedimentación o contaminación en afluentes de agua.

Para la obra en cuestión, fue necesario emplear ambos fluidos de perforación, esto gracias a que con el aire se presentaban varios inconvenientes, entre ellos, la pérdida de aire, como se mencionó anteriormente, pues el suelo presentaba un alto contenido de humedad y el aire no era capaz de barrer con eficiencia la perforación, ya que el suelo con altos grados de saturación tiene un mayor peso, además, por las grietas que se generaban, frecuentemente se derrumbaban las perforaciones, sin embargo no era posible usar solamente agua como fluido de perforación por la presencia de rocas.

A pesar de que la recomendación principal es no emplear aire como fluido de perforación, en muchas ocasiones se emplea por la eficiencia en tiempo que este garantiza, sin embargo, esto resulta contraproducente para el terreno, principalmente cuando se trata de taludes. En muchas ocasiones se presentó que las perforaciones se comunicaban, entonces, al perforar una, el aire era evacuado por la perforación adyacente, esta situación es quizá menos preocupante cuando la inyección que se realizara es IR o IRS, ya que estas emplean presión que permiten que la lechada selle las grietas garantizando así la estabilidad, sin embargo, cuando se trata de inyección IGU, esto representa una gran negligencia ya que no es posible garantizar la estabilidad a largo plazo, pues la lechada llega por gravedad solamente y no garantiza que las grietas se sellen, quedando estas dentro del suelo.

Cuando se estén desarrollando actividades de perforación en taludes inestables es pertinente realizar un monitoreo constante para conocer como se está comportando el suelo, si presenta desplazamientos significativos, que tanto se están ampliando las grietas y a qué velocidad, esto por varios motivos, el principal es la seguridad de las

personas que operan, si se cuenta con un monitoreo eficiente es posible conocer si el talud se encuentra en estado crítico y si es seguro o no realizar intervenciones, ya que de presentarse desprendimientos pueden ocasionarse graves accidentes, otro motivo es conocer la eficiencia de las intervenciones, en estos casos se debe actuar con mucha eficiencia y las etapas de perforación y llenado deben darse casi que de inmediato.

A continuación, se dan las siguientes recomendaciones, las cuales parten de la experiencia adquirida.

Los cabezales empleados deben ser más anchos que la tubería de perforación para garantizar que haya espacio suficiente para que el aire retorne fuera de la perforación con el material sobrante, si esto no se garantiza, es decir, si el aire no tiene espacio suficiente por donde retornar, este buscará salida abriendo grietas a medida que se profundiza en la perforación. Cuando se perfora con aire en terrenos muy agrietados o con vacíos, se puede empezar a perder el aire dentro del suelo, por lo que este no retorna y no realiza de manera satisfactoria el barrido de la perforación, esto se evidencia ya sea porque se observa la grieta a través de la cual se pierde el aire, o se observa que la perforación no está evacuando material suelto, es decir que este está quedando dentro de la perforación y que cuando se retire la tubería la perforación no quedara limpia, en estos casos se vuelve más recomendable trabajar con agua. El aire, es muy recomendable en terrenos rocosos o bastante consolidados, en terrenos blandos no es tan recomendado debido a que genera muchas grietas en el terreno y se pierde mucho el aire, por lo que no queda bien barrida la perforación. Cuando se trabaja en taludes inestables en suelos de consistencia blanda, este puede provocar desgarres en el terreno, ya que a medida que se va perforando con el aire, este va generando grietas que terminan comunicándose hasta provocar el desprendimiento del terreno, ya sea por sí solo, o porque con episodios de lluvia el agua ingresa en dichas grietas hasta provocar el desprendimiento. Por ello es preferible no emplear este tipo de fluido en suelos blandos, ya que además de arriesgar la estabilidad del terreno, los consumos de cemento aumentan debido a la cantidad de grietas que se abren, sin embargo, cuando el elemento se llena rápido y este requiere de inyección a presión (IRS) puede ejecutarse, solo que con mayores cuidados y monitoreos, ya que al realizar la inyección las grietas generadas por el aire se van a sellar con lechada, cuando solo se realizara llenado (IGU) no es recomendable, debido a que las grietas quedaran abiertas, y con el ingreso de agua constante en estas, puede provocarse problemas de estabilidad más adelante.

La experiencia del operador de la maquinaria de perforación es esencial, ya que esto garantiza que los procedimientos se están realizando debidamente permitiendo mejores tiempos de ejecución. Se debe verificar que la perforación queda libre de obstrucciones, para esto, el operador debe ingresar y sacar en repetidas ocasiones la tubería de perforación cuando esté realizando el pozo; el cabezal empleado debe ser más grande que la tubería de perforación empleada, de manera que quede espacio dentro de la perforación para que el fluido de perforación retorne y evacue por la boca de la perforación. Cuando se instale la armadura, esta debe ingresar suavemente y no debe requerirse fuerza para que esta quede ubicada dentro de la perforación

6.2 Armadura – proceso de armado:

6.2.1 Anclajes activos

Para este tipo de anclajes, la armadura se constituye con cables, la tubería de inyección consta de tubería para presión, con perforaciones entre 50cm y 90cm de distancia dependiendo de la profundidad de la perforación, a mayor profundidad más cercanía entre las perforaciones, se cubre con neumático y cinta transparente, por dicha tubería se inyectara la lechada, esta tubería permite que se realice el lavado para realizar las etapas de reinyección; los centradores que son encargados de mantener la varilla central y garantizar que esta quede totalmente cubierta de lechada y protegida de la corrosión, estos se ubican en la armadura según lo indicado en el diseño.

6.2.2 Anclajes pasivos

El refuerzo para este tipo de anclajes consta de varillas de acero corrugadas, debido a que estos no llevan inyección a presión, pues estas solo requieren llenado a gravedad de manera que la varilla quede recubierta por la lechada evitando así la corrosión, este procedimiento se realiza en una sola etapa, para la lechada se usa manguera de polietileno, a esta se le realizan perforaciones cuya distancia depende del concepto de la persona encargada, la función principal que garantizar que la lechada llegue a todos los puntos de la perforación, debido a que la manguera puede taparse en el momento de insertar la armadura, dicha manguera no permite lavado, por lo que una vez realizado el proceso de llenado, no puede volver a introducirse lechada por este medio, y en caso de que el perno no quede lleno o se

presente alguna dificultad, se debe realizarse el llenado por la boca de la perforación, pero de esta manera no se garantiza que toda la perforación quede con lechada, además se debe esperar que la lechada descienda para volver a llenar y el proceso se hace más extenso.

6.2.3 Micropilotes

La armadura de los micropilotes puede llevar diferentes configuraciones en cuanto al acero, sin embargo, la tubería para la inyección siempre llevará la misma configuración, es la misma usada en los anclajes activos, debido a que ambos elementos requieren inyección a presión de la lechada. También debe llevar centradores para garantizar que la varilla quedara totalmente cubierta por la lechada.

6.3 Riesgos

6.3.1 Para el personal

El personal que ejecuta las labores de perforación e inyección se encuentra sometido a ciertos riesgos, dentro de estos, se encuentra por ejemplo:

- Las presiones que se manejan, tanto en la perforación, con fluidos como agua o aire, como en la inyección con fluidos como agua y lechada, si alguna manguera se revienta o se suelta puede ocasionar un efecto látigo que lastime al personal, para esto se deben tener en todo momento los elementos de protección, en el caso de la lechada, si esta llega a caer en los ojos puede ser bastante perjudicial, por lo que se debe ser estricto con estos requerimientos.
- El ruido ocasionado por la maquinaria empleada es bastante fuerte, por lo que se debe contar con protectores auditivos en todo momento.
- Cuando se trabaja en taludes donde la superficie es bastante lisa y se supere la altura exigida para considerarse trabajo en alturas, es estrictamente necesario contar con curso de alturas y ejecutar las actividades con arnés, debido a el nivel de riesgo tan considerable, esta especificación parece obvia pero no lo es, debido a que en muchas ocasiones no se hace, pues los movimientos con arnés se vuelven muy limitados, por lo que los rendimientos disminuyen considerablemente, sin embargo, esto no es excusa para poner en riesgo al personal encargado de ejecutar las labores. Estos riesgos se minimizan haciendo buen uso de los elementos de protección y realizando capacitaciones constantes al personal de manera que se concienticen de los

riesgos a los cuales están sometidos para que estén siempre atentos.

Otro tipo de riesgo, es cuando se trabaja en terrenos inestables, que han presentado signos avanzados de inestabilidad, e incluso, desprendimientos del terreno, debido a las perturbaciones ocasionadas por las actividades de perforación e inyección, estos signos de inestabilidad se agravan acelerando los procesos de desprendimiento del terreno, el riesgo principal sería que ocurriera un deslizamiento que pudiera dejar cubiertos a los operadores, para minimizar este riesgo se deben realizar dos acciones, primero se debe prever la situación y escoger la ubicación de la maquinaria en puntos estratégicos que permitan la evacuación rápida y de manera organizada, atendiendo siempre a un plan de emergencia elaborado previamente, lo segundo, es realizar un monitoreo constante a la zona donde se ejecutan las labores, este monitoreo debe realizarse con máquinas de alta precisión por lo que se recomienda que lo elabore una comisión de topografía; se recomienda tomar puntos suficientes que permitan evidenciar si el terreno está cediendo, para ello, las verificaciones se pueden realizar mínimo una vez al día y hasta tres veces ya que es más que suficiente, además de la continua atención por parte del personal de perforación e inyección a las señales que manifieste el terreno.

6.3.2 Ambientales

Las maquinarias empleadas para la perforación, los compresores de aire y las bombas de inyección requieren de combustible (ACPM) para operar, y emiten gases contaminantes al aire.

Al realizarse la inyección en los terrenos se cambia de inmediato el ciclo del agua subterránea, debido a que la permeabilidad se reduce considerablemente en dicha zona, por lo que el agua ya no desciende de igual manera provocando repercusiones aguas abajo, que quizá no sean significativas a corto plazo, pero a largo plazo puede tener impactos ambientales según la magnitud del proyecto.

Para las labores de perforación cuando esta se realiza con agua a presión y para la inyección se consumen altas cantidades de agua que se devuelve contaminada.

Estos impactos aun no es posible mitigarlos, sin embargo, según la magnitud que tenga el proyecto, se puede elaborar un plan de manejo ambiental en el que busque compensar de cierto modo los daños ocasionados al ecosistema, además en estos planes se especifica si existen afluentes cercanos y los cuidados pertinentes mientras se

ejecuten las actividades de perforación e inyección de manera que no se vean afectados.

6.4 Recomendaciones especiales:

Los estudios de suelos realizados no suelen ser lo suficientemente amplios ni ilustrativos, debido a que se limitan solo a lo exigido en la Norma Sismo Resistente Colombiana, dicha norma abarca los estudios mínimos que deben realizarse para lograr una buena identificación del campo geológico y conocer los parámetros mecánicos del suelo, sin embargo no abarca casos específicos. Para la realización de los micropilotes y anclajes, tanto para la actividad de perforación como de inyección, se tiene siempre mucha incertidumbre al iniciar las actividades, por lo que los rendimientos supuestos pueden no cumplirse, además, es difícil tener parámetros como la presión necesaria para el fluido de perforación de manera que pueda realizar un buen barrido de esta, sin ocasionar muchas grietas.

Para subsanar un poco la incertidumbre, pueden realizarse estudios de suelos más avanzados y más específicos incluyendo ensayos como: permeabilidad, presiómetro, refracción sísmica. Estos estudios no se ejecutan comúnmente debido a los costos que ocasionan, sin embargo, cuando se tratan suelos de gran complejidad estos ensayos pueden ser de gran ayuda, sobre todo para establecer protocolos de ejecución, pues ofrecen parámetros más certeros para realizar predicciones y conocer las posibles respuestas del suelo.

Si los terrenos son muy permeables y con alto contenido de humedad, y además de esto son susceptibles a cambios volumétricos considerables por humedecimiento y secado, es mejor perforar con aire, debido a que el agua puede ser contraproducente y desencadenar procesos de inestabilidad.

Con el ensayo del presiómetro podrá determinarse la presión requerida para que se abran grietas en el terreno, de esta manera podrá reducirse los inconvenientes ocasionados debido a las grietas que se generan con la perforación.

Con los ensayos de refracción sísmica se conoce la dureza del terreno a medida que este se profundiza, y la posible presencia de roca, con esto se podrá determinar de manera más precisa la maquinaria requerida para las perforaciones.

Todos los ensayos mencionados anteriormente reducen el grado de incertidumbre existente para los procesos de construcción de micropilotes y anclajes, por lo que se vuelven muy recomendables.

6.5 Inyección

Inicialmente se debe tener claro qué tipo de cemento se usara, esto dependerá de los tiempos de fraguado deseados o si el suelo contiene ácidos o sulfatos que puedan reaccionar de manera desfavorable con el cemento de uso general, en pocas palabras el cemento debe ser de acuerdo a las necesidades especiales del proyecto. Se debe conocer la proporción usada para la lechada, de esto dependerá si se requiere o no el uso de aditivos plastificantes para mejorar la fluidez en caso de que la lechada sea muy espesa, pues de esta característica depende que la mezcla pueda inyectarse.

Se debe prever el lugar en qué lugar se instalara el equipo de inyección, ya que este requiere un espacio suficiente para realizar el acopio de cemento, ubicar los tanques de agua, los mezcladores y la bomba de inyección, en caso de que el punto de ubicación del equipo este por debajo de la cota del terreno a inyectar, o que las mangueras que conducen la lechada desde la bomba hasta la perforación supere los 50 metros de longitud, deberá medirse la presión de salida, es decir, se dejara fluir la lechada a través de la manguera libremente y se medirá la presión que marca el manómetro de la bomba, esa presión debe tenerse muy en cuenta y descontarse de la presión que marque la bomba cuando se esté inyectando el suelo, por ejemplo, la presión de salida fue de 50psi, y la presión que marca cuando se está inyectando el terreno es de 170psi, la presión real de inyección será 120psi.

El lugar escogido para la instalación del equipo debe contar con suministro de agua permanente ya que esta actividad demanda altos consumos, tanto para la mezcla como para el lavado del equipo. Además de contar con el espacio suficiente para la instalación del equipo, y el suministro de agua, se debe analizar hacia qué punto se quiere dirigir el remanente de agua que resulta de esta actividad ya que, si no se hace un buen manejo de esta, puede provocar inconvenientes a otros frentes de trabajo, teniendo claro cuál será el punto de disposición se deben realizar las siguientes obras:

- Brechas para que el agua se dirija de manera satisfactoria hasta el punto escogido.

- Se deben realizar pozos en el suelo los cuales servirán para recibir el agua y la lechada producto del lavado de los equipos, se recomienda construir tres pozos consecutivos que estén conectados entre sí y a su vez a la brecha que conducirá el agua hasta el sitio escogido. La intención es que al lavar el equipo de inyección, tanto las mangueras como los contenedores donde se realiza la mezcla de la lechada, se deposite todos los fluidos producto de esta acción en los pozos, la lechada al ser más densa que el agua se asentara en el fondo del pozo y el agua quedara por encima continuando su curso a través de los siguientes pozos hasta llegar a la brecha, de esta manera la lechada no llega a sitios no deseados evitando así taponamiento de tuberías o la llegada de cemento a afluyente. Debido a que la lechada se endurece, el pozo se va colmatando, cuando se llene el primer pozo, la lechada pasara el segundo pozo a su vez al tercer pozo, si el tercer pozo se llena y aun no se han terminado las labores de inyección se deberán elaborar pozos adicionales o la limpieza de los pozos ya existentes. La construcción de los pozos debe garantizar que la lechada quede dentro de estos, mientras que el agua continuara su curso hasta las brechas.

La primera etapa que se realiza es la del llenado, esta etapa no requiere ninguna presión, solo busca cubrir el espacio entre la armadura y las paredes de la perforación; se ingresa la tubería de inyección a través de la tubería que va unida a la armadura, la bomba empieza a impulsar la lechada, cuando se verifica que la lechada está llegando a la boca de la manguera se conecta a la tubería de inyección, a través de la perforación empiezan a ascender fluidos, ya sea porque la perforación se realizó con agua, o por aguas de infiltración o nivel freático, dichos fluidos se deben evacuar por completo, pues se debe garantizar que la perforación quede llena totalmente por la lechada, por tal motivo solo se frena la bomba cuando el fluido que sale de la perforación es igual al fluido que se está succionando de los mezcladores. En algunas ocasiones, la lechada empieza a brotar por la perforación indicando que esta quedo llena, sin embargo, comienza a asentarse, esto puede ser porque el suelo presenta grietas a lo largo de la perforación y la lechada empieza a perderse, en estos casos es necesario realizar un "recebo", es decir, se espera un tiempo prudente luego del primer llenado, y se termina de llenar la parte superficial de la perforación con lechada. La tubería de inyección que va adherida a la armadura debe lavarse para poder realizar la actividad de inyección, esta acción debe ejecutarse cada que se tenga conocimiento que se deben realizar reinyecciones, cuando ya el elemento no requiera más

inyección esta tubería debe quedar llena de lechada. Todo esto se concluyó basado en la observación constante de los procesos ejecutados por los diferentes operadores de la bomba de inyección, debido a que no todos realizan los procesos correctamente, y de inmediato se evidenciaban los inconvenientes.

La siguiente etapa consiste en la inyección de la lechada a presión, la presión de inyección de la lechada viene dada desde el diseño, dicha presión debe considerar muy bien que tipos de suelos se están tratando, pues manejar presiones excesivas en suelos que presentan muchas grietas, espacios de aire, que tienen un alto grado de humedad, además de propiedades mecánicas deficientes puede ocasionar problemas de estabilidad, sobre todo si se tienen taludes cerca; también se deben considerar las estructuras aledañas, pues la lechada dentro del suelo, abre grietas por donde el suelo se encuentre más blando, incluso puede ascender a través del suelo hasta reventar en la superficie, esto puede ocasionar inconvenientes de darse en propiedades ajenas, pues la lechada puede ocasionar daños en siembras o incluso agrietar viviendas.

Debido a que es imposible predecir por donde brotara la lechada en la superficie es muy difícil de controlar, se debe tener estricto cuidado, pues el cemento es altamente contaminante y no puede llegar a afluentes, pues esto implica un problema ambiental bastante serio, tampoco debe llegar a redes de acueducto o alcantarillado, ya que al endurecerse provoca el taponamiento de la tubería.

Para esto se implementan dos acciones, la primera es delegar a alguien de la cuadrilla para que vigile el área aferente del punto de inyección y en caso de que observe lechada fluyendo en la superficie informe de inmediato al operador de la bomba para que frene la actividad. La segunda acción trata del control de la presión de inyección, esta es la parte más importante de la actividad, pues según las presiones alcanzadas se puede inferir que tan competente es el suelo, esto le compete al operador de la bomba debe verificar constantemente el manómetro de estapa para verificar la presión, si esta empieza a aumentar y en debido momento cae, implica que la lechada está fluyendo libremente, esto puede darse por dos situaciones, la lechada ascendió hasta la superficie y empezó a brotar o dentro del suelo la lechada está fluyendo libremente, esto se da porque dentro del suelo existen vacíos considerables, ya sea por grietas o por tubificación. En ambos debe pararse la inyección, y dar un buen tiempo de fraguado para que las grietas se sellen, de otra manera la lechada inyectada se perderá.

El tiempo de fraguado entre la etapa de llenado e inyección y entre cada etapa de inyección es primordial, pues el suelo posee grietas, y la inyección las amplía o crea nuevas y las deja llenas de lechada, si esta no está no ha alcanzado la suficiente resistencia, al realizar la inyección nuevamente, la lechada saldrá por la misma grieta y esta no sellará, si cumple el tiempo de fraguado adecuado, las grietas selladas anteriormente no volverán a abrirse, de esta manera se sellan nuevas grietas hasta que se termina la etapa de inyección.

Se puede considerar que la etapa de inyección ha culminado bajo 2 criterios: la primera es que se logró la presión de inyección, dicha presión se mide en el manómetro de la bomba y debe considerarse la pérdida de presión generada por llevar la lechada desde la bomba hasta el punto de inyección, la presión marcada en el manómetro debe sostenerse, no puede estar fluctuando, o decir que se logró pero que luego se perdió la presión; el segundo punto es que se logre el consumo mínimo de cemento por metro lineal en toda la perforación, ya que esto significa que el elemento quedo con el cubrimiento necesario.

Es importante diferenciar en que elementos se realiza el último paso que es el de la inyección a presión, por ejemplo, en los anclajes pasivos, o en micropilotes donde se indique tipo de inyección IGU en el diseño.

7 Conclusiones

- La ejecución de micropilotes y anclajes, deben ser muy controladas debido a las repercusiones que pueden presentar, pues los procedimientos constructivos son muy invasivos y pueden llegar a afectar la estabilidad del terreno, incluso, los flujos de agua subterráneos.
- Cuando se estén interviniendo terrenos inestables se debe realizar un monitoreo constante de ser posible, con herramientas de alta precisión, es decir, topográficas. En el caso de estudio, esto no se realizó debido que no se le da la prioridad que merece y a los costos que acarrea la instalación de elementos de precisión dispuestos para tal fin, como lo son los inclinómetros.
- Se debe realizar un análisis previo a la ejecución de las actividades, con el fin de prever posibles riesgos, como movimientos de la masa de suelo, o malos procedimientos que desencadenen en un proceso de inestabilidad.
- Se debe contar con una muy buena identificación geotécnica para que se pueda tener éxito en la ejecución, ya que según esto

se escoge el fluido de perforación, presión de inyección, cabezal de perforación para obtener mejores rendimientos y tener menores riesgos

8 Referencias Bibliográficas

- [1] Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera, Ministerio de fomento, España. 2005. Disponible en: https://www.fomento.es/recursos_mfom/0710200.pdf
- [2] Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno, Ministerio de fomento, España. 2001. Disponible en: https://www.fomento.es/recursos_mfom/0710300.pdf
- [3] Wikipedia. Ensayo presiométrico. 6 de abril de 2015. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_presiom%C3%A9trico. 10 de enero de 2019
- [4] Ensayos de permeabilidad del suelo. Construmatica. Barcelona. Recuperado de: https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayos_de_Permabilidad_del_Suelo. 12 de enero de 2019
- [5] Trujillo Trujillo, Mauricio. 6 de diciembre de 2012. Exploración sísmica. [Blog]. Recuperado de: <http://exploracionsismica.blogspot.com/>. 15 de enero de 2019