

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

MUROS ANCLADOS EN ARENAS, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE ANCLAJES

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller

José Joao Rengifo Reátegui

ASESOR: Manuel Olcese Franzero

Lima, diciembre del 2015

RESUMEN

La presente tesis pretende realizar una comparación entre tres técnicas de anclaje: anclajes temporales pos tensados, anclajes auto-perforantes y suelos enclavados, para ejecutarse en suelos arenosos en el Perú.

Para ello se definirá los conceptos teóricos de cada técnica de anclaje para conocer los detalles particulares que implican cada una de estas técnicas. Se empieza describiendo la técnica más aplicada en el Perú, que son los anclajes temporales pos tensados y realizando la presentación de otras dos técnicas muy usadas a nivel mundial, pero que aún no se aplican en el Perú por falta de conocimiento de las mismas.

Se efectúa el diseño de un anclaje general, que es independiente del tipo de técnica que se elija, con las características propias de un suelo arenoso. Dichas características se obtienen con un estudio de mecánica de suelos, donde se conocerá los esfuerzos ejercidos por el suelo para una profundidad del terreno de 12 m. Así se puede definir la profundidad de falla del terreno y asimismo determinar la longitud del anclaje a utilizar.

Con el propósito de tener una comparación objetiva, se describe los procesos constructivos, la maquinaria y los equipos utilizados en cada técnica de anclaje y así, de esta manera, se realiza un análisis independiente de costos (por punto de anclaje o por metro lineal), tiempos de ejecución (rendimiento) y la seguridad en la realización de los trabajos de cada técnica de anclaje.

Finalmente, se realiza un cuadro comparativo entre cada técnica de anclaje el cual tendrá los datos de costos, tiempos y seguridad (medido como el nivel de riesgos) obtenidos en el desarrollo de esta tesis y se concluye analizando las ventajas y desventajas de cada técnica en particular.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TEMA: “Muros Anclados en arenas, análisis y comparación de técnicas de anclajes”.

ÁREA: Geotecnia

ASESOR: Ing. Manuel A. Olcese Franzero

ALUMNO: José Joao Rengifo Reátegui

CÓDIGO: 20077131

TEMA N°

FECHA: 30/11/2015

INTRODUCCIÓN

El presente informe desarrollará los temas más importantes de la investigación y diseño a realizarse para los anclajes de muros pantallas sobre condiciones de suelos arenosos en el Perú para taludes verticales generados para la construcción de sótanos, describiendo las técnicas existentes de anclaje como la tradicional (anclaje temporal pos tensados), tirabuzón y suelo enclavado (“soil nailing”) para realizar cuadros comparativos entre diseños, procesos constructivos, tiempos, costos, seguridad.

Pero esta técnica también tiene sus complicaciones ya que cabe resaltar la dificultad de la estabilización de los taludes arenosos y de los peligros que estos conllevan y por ende los riesgos que esto tiene en todo momento del proyecto. Además que ahora existen varias técnicas de anclaje para sostenimiento de muros y hay pocos estudios que describan de manera clara y detallada las ventajas y desventajas ni la conveniencia económica de la mejor realización de muros anclados en suelos arenosos y cuál debe ser la mejor técnica de anclaje para realizarse.

OBJETIVOS

- Conocer, describir y realizar el diseño geotécnico de manera básica y detallada de los distintos tipos de anclajes para muros de sostenimiento de taludes en suelos arenosos y evaluar sus resultados para proyectos con tres sótanos de 9 metros de profundidad.
- Describir las técnicas de anclajes conocidas: tradicional (anclajes temporales pos tensados), tirabuzón y suelo enclavado, para poder realizar un análisis comparativo.
- Presentar una descripción general para los procesos constructivos para cada técnica de anclaje considerando también los tiempos y costos de cada uno de ellos.

- Presentar tablas de resultados comparativos obtenidos de los análisis de todos los casos en todos sus aspectos como diseño, técnica de procesos constructivos, costos, tiempos, riesgos y seguridad.

PLAN DE TRABAJO

Investigar y describir los detalles de cada técnica de anclajes aquí presentadas para entablarlos como marco teórico y definirlos en la presente tesis.

Desarrollar los requisitos previos antes de cada diseño, como por ejemplo los estudios de mecánica de suelos necesarios.

Realizar el diseño propiamente dicho de un anclaje en suelos arenosos (independientemente de la técnica a utilizar).

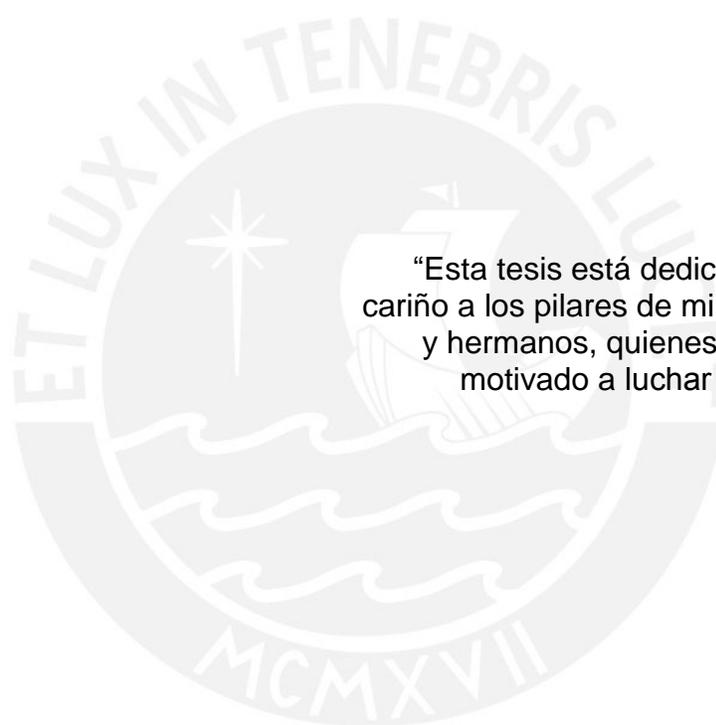
Definir el proceso constructivo de cada técnica de anclaje.

Realizar un marco comparativo entre tiempo y costos.

Elegir la técnica más conveniente (la de menor costo, tiempo y mayor seguridad) a la que se llega en las conclusiones de la presente tesis.

NOTA

Extensión Máxima: 100 páginas



“Esta tesis está dedicada con especial cariño a los pilares de mi vida: mis padres y hermanos, quienes siempre me han motivado a luchar por mis sueños.”



“A mi Mama María y a mi Papa Manuel
quienes desde el cielo me cuidan, iluminan
mi camino y guían mis pasos.”

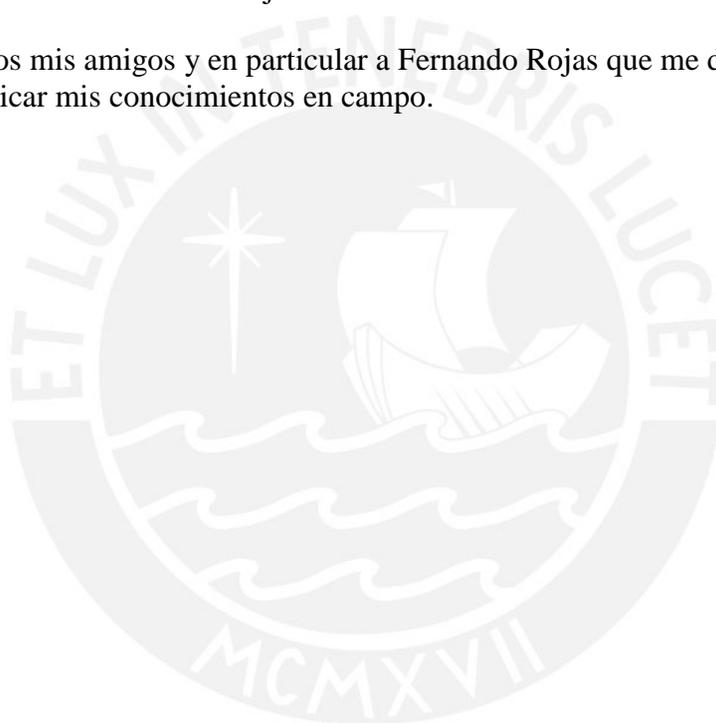
AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a toda mi familia que en todo este largo proceso de estudio e investigación siempre han estado apoyándome y confiando en mi para seguir día a día esforzándome más por conseguir mis metas.

Asimismo, expresar un especial agradecimiento a mi asesor Ing. Manuel Olcese Franzero, por su confianza, paciencia, guía, consejos y aportes en la estructura y desarrollo en los temas de mi tesis.

Del mismo modo expresar un sincero agradecimiento a los Ingenieros Jorge Zegarra, Guillermo Zavala y Viviana Moreno quienes me han brindado su apoyo incondicional y facilitaron la elaboración de este trabajo.

Finalmente a todos mis amigos y en particular a Fernando Rojas que me dio la oportunidad de aprender y aplicar mis conocimientos en campo.



ÍNDICE

1.	CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Alcances.....	2
1.4	Estado del arte	2
2.	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	5
2.1	Modos de ruptura.....	6
2.2	Condiciones de fallas en suelos arenosos	7
2.3	Partes de un anclaje	9
2.4	Anclajes temporales Post Tensados (técnica tradicional)	13
2.5	Anclaje Tirabuzón (Auto perforantes).....	15
2.6	Suelo enclavado (“soil nailing”).....	17
3.	CAPÍTULO 3: DISEÑO.....	19
3.1	Requisitos previos	19
3.1.1	Estudio de mecánica de suelos	19
3.1.2	Programa de diseño GeoStudio	23
3.2	Diseño de anclajes	24
4.	CAPÍTULO 4: PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y MAQUINARIA.....	43
4.1	Anclajes temporales Post tensados	43
4.1.1	Proceso constructivo.....	43
4.1.2	Equipos y maquinaria	45
4.2	Suelo enclavado.....	48
4.2.1	Inclusiones:.....	48
4.2.2	Equipos y maquinaria	50
4.3	Anclajes Tirabuzón (Auto Perforantes).....	53
4.3.1	Principales características.....	54
4.3.2	Técnica de perforación	55

5. CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y COMPARACIONES	57
5.1 Anclajes temporales Post Tensados.....	57
5.1.1 Costos	57
5.1.2 Plazos de entrega	59
5.1.3 Seguridad	60
5.2 Suelos enclavados.....	61
5.2.1 Costos	61
5.2.2 Plazos de entrega	63
5.2.3 Seguridad.....	63
5.3 Auto Perforantes	64
5.3.1 Costos	64
5.3.2 Plazos de entrega	65
5.3.3 Seguridad.....	65
5.4 Resumen comparativo	66
6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	67
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Muro anclado construido en centro urbano.....	6
Figura 2. 2 (a) Nomenclatura de una zona de falla. (b) Distintos tipos de falla.....	7
Figura 2. 3 Mecanismo básico de un anclaje.....	9
Figura 2. 4 Partes de un Anclaje.....	9
Figura 2. 5 Cabeza y Placa de apoyo.....	12
Figura 2. 6 Vista transversal de la zona libre y de la zona de bulbo	12
Figura 2. 7 Tipos de Barras de anclaje	16
Figura 2. 8 Partes de un anclaje tirabuzón (Provisional).....	16
Figura 2. 9 Anclajes “Soil Nailing”. Estación Los Orientales Metro de Santiago Línea 4..	18
Figura 3. 1 Ubicación de las perforaciones cercanas a la propuesta del muro para el estudio de suelos.	20
Figura 3. 2 Ensayo de Penetración Estandar (SPT).....	21
Figura 3. 3 Criterios de Falla a considerar en el diseño de anclajes.....	25
Figura 3. 4 Fuerzas de anclaje transmitidas detrás de la zona de anclaje con la determinada inclinación.	25
Figura 3. 5 Abaco de Bustamante para la resistencia de arrancamiento del bulbo.	26
Figura 3. 6 Variaciones del empuje del suelo en distintos estados.	27
Figura 3. 7 Ángulos considerados para el empuje activo y de reposo.....	28
Figura 3. 8 Muros anclados por sistemas descendentes.	30
Figura 3. 9 Equilibrio de la cuña de la masa de suelo para obtener el polígono de fuerzas.	31
Figura 3. 10 Nomograma de fA para el cálculo de Ah +.....	32
Figura 3. 11 Comparación entre diferentes envolventes de esfuerzos aparentes (a) Schnabel, (b) Terzaghi y Peck en arenas.....	33
Figura 3. 12 Diagrama de empujes.....	35
Figura 3. 13 Empuje pasivo para cálculo de la profundidad de hinca.....	36
Figura 3. 14 Disposición de los anclajes en el ejemplo.....	37
Figura 3. 15 Disposición del tirante anclado.	38
Figura 4. 1 Proceso constructivo de anclajes pos tensados.	43
Figura 4. 2 Máquina Perforadora, inyectora Stenuik P600.	45
Figura 4. 3 Máquina Compresora de aire de 18 bares.	46
Figura 4. 4 Cables para el Post Tensado.....	47
Figura 4. 5 Equipo de inyección de concreto. ⁴⁰	47
Figura 4. 6 Gata pos-tensadora de cables. ⁴⁰	47
Figura 4. 7 Procedimiento suelo enclavado.....	48
Figura 4. 8 Maquinaria para perforación de inclusión “nail”	52
Figura 4. 9 Gata hidráulica efectuando prueba de carga en “nail.”	52
Figura 4. 10 Elementos Fundamentales del “Nail”. ⁴³	52
Figura 4. 11 Sistema de anclaje auto perforante.....	54
Figura 4. 12 Sistema 3 en 1 Perfora, coloca la armadura e inyecta concreto. ⁴⁴	54
Figura 4. 13 Elementos que conforman el sistema auto perforante.....	55
Figura 4. 14 Perforación e inyección simultanea	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Resistencia media al deslizamiento de bulbos inyectados	11
Tabla 2. 2 Características de barras de anclajes habituales.	17
Tabla 3. 1 SPT y Densidad Relativa para suelos granulares.	21
Tabla 3. 2 Ensayos de Laboratorio de Mecánica de Suelos.	22
Tabla 3. 3 Coeficientes de ponderación para empujes.	28
Tabla 5. 1 Presupuesto muros anclados hasta el tensado.	58
Tabla 5. 2 Costo por metro lineal de anclaje.	60
Tabla 5. 3 Relación de Peligros en las actividades de anclajes.	61
Tabla 5. 4 Presupuesto “Soil Nailing”	62
Tabla 5. 5 Seguridad en obra “Soil Nailing”	63
Tabla 5. 6 Presupuesto Barra Auto perforante.	65
Tabla 5. 7 Seguridad en obra Auto Perforantes.	65
Tabla 5. 8 Cuadro comparativo entre técnicas de anclaje.	66
Tabla 5. 9 Clasificación del Riesgo	66
Tabla 5. 10 Matriz de Valoración	66

1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 Introducción

La construcción es uno de los principales sectores de la economía nacional y representa un 7% del PBI. Entre los años 2000-2014 ha estado en una época de auge, el cual se estima que continuará en el periodo 2015-2030. En ese sentido, la construcción contribuye de manera muy importante al incremento de la riqueza del país, además que es una de las principales actividades generadoras de empleo con un buen salario.

Entre las actividades de la construcción, se encuentra la edificación de viviendas unifamiliares y multifamiliares, donde la necesidad mayor por la expansión de la población, ya sea por el incremento de natalidad o por la centralización en todo el país, se ha encontrado con el problema de la limitación de expansión horizontal. En consecuencia, la ingeniería civil ha encontrado una solución de crecimiento vertical tanto hacia arriba con edificios de hasta 25 pisos, como hacia abajo con la construcción de distintos niveles de hasta 9 sótanos, generalmente usados como estacionamientos. En ese sentido, se ha desarrollado un sistema de estabilidad de taludes verticales, que se genera por la excavación del terreno, con un sostenimiento del mismo con una técnica en el Perú conocida como muros anclados. Anteriormente, se usaba la técnica de Calzaduras, pero era una técnica invasiva al terreno aledaño, costosa y muy peligrosa para el personal involucrado. Debido a la informalidad, esta técnica ha tenido muchas pérdidas humanas por el poco control de seguridad en su realización y con límites de profundidad.

Gracias al avance tecnológico y científico, se ha desarrollado con éxito en varias obras los muros anclados que, también, sirven de muros estructurales o placas de base para todo el edificio. Estos muros tienen muchos beneficios económicos estudiados y comprobados. Sin embargo, esta técnica, también, tiene complicaciones, debido a la dificultad de la estabilización de los taludes arenosos. Esto resulta peligroso y genera riesgos en el proyecto. Además, ahora existen varias técnicas de anclaje para sostenimiento de muros y existen pocos estudios que describan de manera clara y detallada las ventajas y desventajas de estas. Tampoco se describe la conveniencia económica de la mejor realización de muros anclados en suelos arenosos y cuál debe ser la mejor técnica de anclaje para realizarse.

El presente informe desarrollará la investigación y diseño de los anclajes de muros sobre suelos arenosos para taludes verticales generados en la construcción de sótanos en el Perú. Así, se describen las técnicas existentes de anclaje como la tradicional (anclaje temporal pos tensados), tirabuzón y suelo enclavado con el fin de realizar cuadros comparativos entre procesos constructivos, tiempos, costos y seguridad.

1.2 Objetivos

- Conocer, describir y realizar el diseño geotécnico de manera básica y detallada de los distintos tipos de anclajes para muros de sostenimiento de taludes en suelos arenosos y evaluar sus resultados para proyectos con 3 sótanos de 12 metros de profundidad.
- Describir las técnicas de anclajes conocidas: tradicional (anclajes temporales postensados), tirabuzón y suelo enclavado, para la realización de un análisis comparativo.
- Presentar una descripción general para los procesos constructivos para cada técnica de anclaje considerando, también, los tiempos y costos de cada uno de ellos.

1.3 Alcances

Se describe el estado del arte de los muros pantalla en suelos granulares tipo arena, de manera teórica en base a la información que se pudo recolectar de las referencias bibliográficas, entrevistas, consultas con el asesor y casos de proyectos pasados nacionales e internacionales.

Los procesos constructivos están descritos en base a la bibliografía e información recolectada de Patente conocida.

Este proyecto tendrá alcance limitado y centrado a suelo arenoso para edificaciones con 3 sótanos de 12.5 metros de profundidad que requieran de alguna de estas técnicas para estabilizar los suelos arenosos.

Se busca que el presente trabajo sea una referencia al momento de determinar de manera más rápida, eficiente y segura el uso de la técnica más conveniente de anclajes de muros teniendo como referencia el tipo de suelo de la arena para proyectarse a diseñar el anclaje, conociendo las propiedades físicas de la arena donde se realizará el anclaje, detalles de la edificación o profundidad, y del presupuesto y tiempo que se disponga para realizar el proyecto para una mejor elección.

Se describe el estado del arte del proceso constructivo de los anclajes en obras de tierras de manera teórica en base a la información recolectada (bibliografía y proyectos pasados).

1.4 Estado del arte

El presente trabajo tiene como base las siguientes fuentes:

1). La tesis titulada “Descripción teórica de calzaduras y muros anclados en la grava de Lima” de Ethel Cortegana (2012) tuvo un enfoque objetivo y un gran análisis de técnicas a utilizarse para muros anclados, así como de calzaduras. Esta se basó en un tipo de suelo específico como lo es la grava de Lima y, además, se realizó un análisis comparativo de costos.

2). La ficha técnica “Proceso constructivo de muro anclado” de Geofortis (2013) detalla cuáles son los procedimientos a seguir en la instalación de los muros anclados desde el movimiento de tierras, perforación y fabricación de anclajes, armado y lanzado de concreto y finalmente anclaje realizado en una obra en Costa Rica.

3). La tesis titulada “Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras y su interacción con el terreno, para su empleo en obras de infraestructura viaria” de Gonzalo Jara (2008) presenta un amplio estudio sobre muros de contención de tierras en infraestructuras viarias para la estabilidad de taludes naturales, formación de terraplenes de carreteras, formación de estribos para puentes de pasos, entre otros. Debido al avance tecnológico de las últimas décadas, se presentan nuevas alternativas de solución como complemento a lo tradicional. Se ha incorporado nuevos materiales para su diseño, así como también nuevos métodos constructivos y la creación de nuevos elementos estructurales con la inclusión de armaduras metálicas o geo-sintéticos y empleo de concreto pre-fabricado en muros. Así, se van disminuyendo los costos y tiempo. Además, mejora la calidad final de la estructura y, también, de otros materiales compuestos que tienen menor peso. Por eso, ya no sería necesario el uso de maquinaria pesada para su instalación y es, a su vez, más amigable con el medio ambiente.

4). La presentación “Sistema de estabilización del terreno para el caso de excavaciones de edificios con sótanos. Caso especial de muros anclados” del Ing. Antonio Blanco e Ing. Maritza Ramos (2010) se centra en la comparación entre la construcción de muros anclados y la tradicional técnica de calzaduras, en construcciones de sótanos de hasta 5 pisos de profundidad para edificios cimentados en distintos tipos de suelos. De esta forma, se describe al sistema de muros anclados como un sistema más seguro. Además, se describe en todas sus fases: estimación de fuerzas de anclaje, pre dimensionamiento del espesor del muro, proceso constructivo, de los muros y anclajes, y diseño de los muros además de otros sistemas.

Las comparaciones empiezan por la variación de la capacidad portante que presenta el terreno. Debido a que los terrenos sueltos cuentan con baja capacidad portante, no es fácil realizar una excavación y construir calzaduras. Esto porque los empujes laterales son mayores en estos casos, ya que depende de distintos factores. Además, las calzaduras pueden generar problemas con las construcciones vecinas como ligeras fisuras, además de invadir el terreno vecino por lo cual se buscaron nuevas soluciones. En el Perú, principalmente se usa la de muros anclados pos tensados. Finalmente, se explica el procedimiento de construcción de cada una de estas técnicas.

5). La publicación “Aspectos constructivos, consideraciones de diseño y monitoreo de muros anclados en excavaciones profundas. Caso práctico: Edificio Cipreses Lima” de Saucedo, Raygada y Matos (2010) trata sobre la tecnología del Muro Anclado establecida en Lima como una de las preferidas para realizar los trabajos de estabilización de excavaciones profundas en zonas urbanas. Esto se debe a las características físicas propias del suelo que presenta Lima, especialmente en las zonas de mayor construcción en altura y donde el suelo no presenta nivel freático. Estas características resultan ideales para la aplicación del Muro Anclado, porque permite la excavación secuencial mediante el uso de paneles intercalados. En esta publicación, se muestran, también, las consideraciones de diseño y trabajo de monitoreo final del proyecto Edificio Cipreses en el distrito de San Isidro.

6) La presentación “Proyecto de muros pantalla para el edificio Centro Plaza” de David Mozó (2012) trata sobre una edificación de 18 pisos y 4 niveles de sótanos cimentados exclusivamente sobre arenas limosas y arenas mal graduadas. Se realizó un estudio completo y detallado de la mecánica de suelos, la técnica de diseño (con su respectivo programa) y anclaje, el procedimiento constructivo y la maquinaria que intervino. Se obtuvieron resultados satisfactorios, considerando todas las variables que pudieran causar un daño a futuro a las viviendas aledañas y caso especial de sismos.

Se concluye que todas esas investigaciones presentadas, serán la base de la investigación de la presente tesis, ya que brindan los conceptos generales y el marco teórico necesario para poder plantear la comparación de técnicas de anclajes. Presentan además un avance en la tecnología de la construcción y los cambios necesarios a lo largo del tiempo para la contención de muros para edificaciones en el Perú. Estas investigaciones estudian el cambio de la técnica de calzaduras a muros anclados y de las ventajas, constructivas y económicas, que este cambio presenta.

2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Actualmente en el Perú, los anclajes constituyen un medio muy importante para garantizar la estabilidad de diversas estructuras.

Un anclaje es un elemento estructural instalado en el suelo y que se utiliza para transmitir una carga de tracción aplicada. El objetivo del anclaje es sostener y, por lo tanto, reforzar las masas de suelos que, debido a la baja capacidad portante que poseen, están propensas a fallar. Entonces, estas masas son potencialmente inestables, pero pueden ser estabilizadas por los anclajes. Esto debido a que generan un incremento en las tensiones normales y en la resistencia al esfuerzo cortante del terreno mediante la transmisión de fuerzas externas a la profundidad de diseño. Por ello, es esencial tener un conocimiento de las características geotécnicas del suelo a trabajar, sobre todo para este caso en particular de arenas.

El sistema de muros anclados está comprendido por tres técnicas (tradicional –anclajes temporales pos tensados–, tirabuzón y suelo enclavado), las cuales son cada vez más usadas. Así, se puede concluir que la utilización de los anclajes ha sido considerada como una buena alternativa técnica y económica. Además, los muros anclados ofrecen mayor seguridad durante la construcción y menor vibración del suelo. Esto asegura la ausencia de riesgos innecesarios que podrían generar pérdidas humanas.

En ese sentido, el muro anclado forma parte integral de la estructura y de las fundaciones del edificio, además que consume menos tiempo en construcción. Cabe señalar que un buen diseño puede ofrecer mayor capacidad de soporte y reducir los asentamientos diferenciales. No obstante, es importante resaltar que todos estos beneficios se pueden obtener si se realizan estudios previos y un diseño cuidadoso no solo de la estructura del muro, sino también del anclaje en sí.

Al diseñar un sistema de anclajes es fundamental no sólo realizar todas las comprobaciones de estabilidad, sino también un análisis detallado del tipo de anclaje que mejor se adapte al terreno. Esto debe ir acompañado de una adecuada disposición que permita la ejecución del refuerzo metálico. De esta forma, se asegura que los elementos que trabajan a tracción mejorarán las condiciones de equilibrio de la estructura incorporando las fuerzas de masa por unidad de volumen que las circunda.

El criterio actual de diseño puede ser clasificado en dos principales grupos. El primero se basa en la teoría de la elasticidad, la cual presenta limitaciones cuando se trata de masas rocosas. El segundo criterio involucra la selección de parámetros mediante reglas empíricas.

Diseñar un sistema de anclajes es un proceso complejo. Este requiere un conocimiento detallado de la geología del sitio, las propiedades del suelo (en este caso, arenas) y las condiciones hidráulicas del suelo. Finalmente, es importante saber estimar la magnitud y dirección de los esfuerzos antes y después de la excavación.

2.1 Modos de ruptura de un anclaje

A continuación, se presentan los modos de ruptura de un anclaje y las condiciones principales de los suelos a estabilizar.

- Ruptura de masa de suelo
- Ruptura de interfase acero-lechada de cemento.
- Ruptura del contacto suelo-lechada de cemento
- Ruptura de la barra de acero.

El área principal de la aplicación de anclaje es estabilizar la masa rocosa o de suelo que no está en equilibrio consigo misma mediante la transmisión de fuerzas externas a la profundidad diseñada.

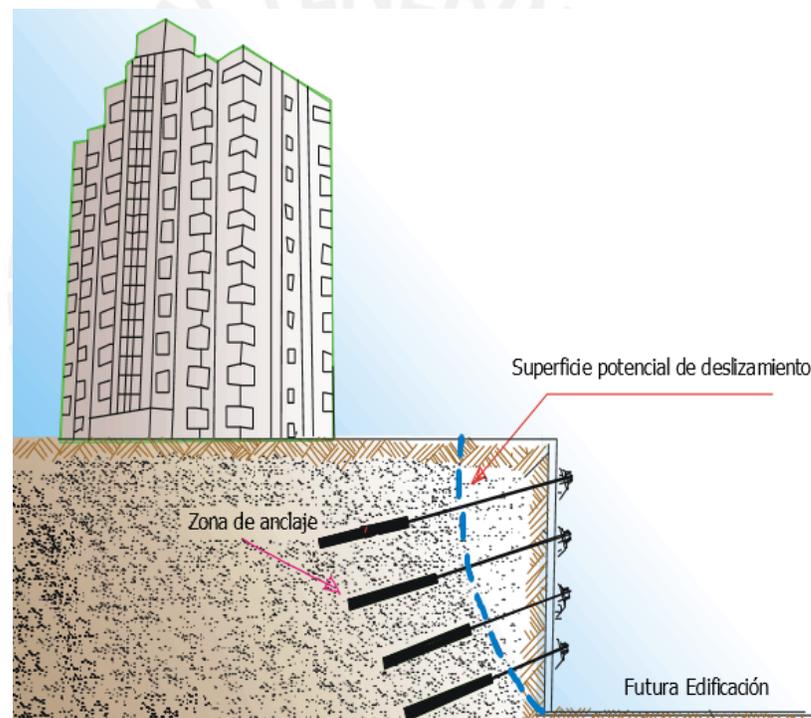


Figura 2. 1 Muro anclado construido en centro urbano.¹

Un proyecto de análisis, diseño y construcción de muros anclados es complejo debido a las diversas variables geotécnicas involucradas en el análisis para asegurar su estabilidad durante y después de su construcción. El presente estudio se centra en muros anclados en arenas, para lo cual es importante mencionar algunas de las dificultades más importantes que se presentan al trabajar en este tipo de suelo.

¹ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid 2004, p.28 Figura 1.3.

2.2 Condiciones de fallas en suelos arenosos

Se debe tomar en cuenta que los suelos arenosos son altamente inestables si no se toman las precauciones del caso. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, ya que se realiza una excavación en una formación de terreno natural. El deslizamiento de un talud puede tener consecuencias graves que pueden implicar pérdidas de vidas humanas y bienes. Es por esto que la estabilidad del suelo arenoso se debe asegurar de una manera tal que resulte no solo económica sino lo más confiable.

Se denomina deslizamiento a la rotura y al desplazamiento del suelo situado debajo de un talud que origina un movimiento hacia abajo y hacia afuera de toda la masa que participa.

Los deslizamientos se pueden producir de distintas maneras, ya sea rápida o lenta, con o sin provocación aparente, pero generalmente es consecuencia de excavaciones en el pie del talud y, en otros casos, por un aumento de presiones debido a filtraciones de agua.

Se puede presentar el caso de deslizamiento por movimiento del cuerpo del talud. Básicamente, se considera que la superficie de falla se forma cuando en la zona de su futuro desarrollo actuarán esfuerzos cortantes que sobrepasarán la resistencia al corte del material. En consecuencia, sucederá la rotura junto a un deslizamiento a lo largo de la falla.

En el caso de las fallas en arenas, se puede presentar Falla Traslacional, el cual suele presentarse en estratos de arenas finas, además de arcillas blandas o limos no plásticos. La debilidad de este estrato está altamente ligada a la elevación de presión de agua (acuíferos).

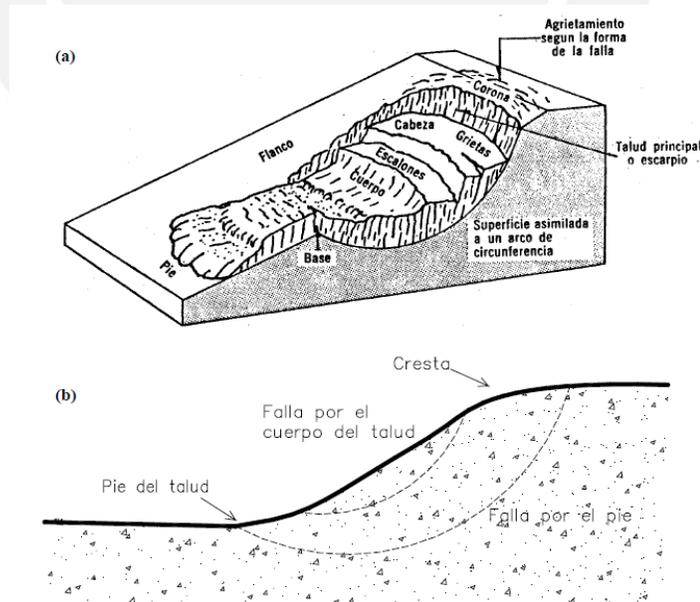


Figura 2.2 (a) Nomenclatura de una zona de falla. (b) Distintos tipos de falla.²

² DE MATTEIS, Álvaro. *Estabilidad de Taludes*. Universidad Nacional de Rosario. Agosto 2003.

En las figuras 2.2 y 2.3 podemos observar las zonas de fallas que presenta un suelo y el mecanismo básico de funcionamiento de un anclaje para poder controlar dichas fallas del terreno.

Asimismo, la lluvia presenta un efecto importante, porque influye en la forma, en la incidencia y en la magnitud de los deslizamientos. Tiene un efecto acumulativo, porque puede llegar a saturar el terreno y activar un deslizamiento. Se deben considerar tres aspectos importantes: el ciclo climático en un periodo de años, la acumulación de pluviosidad en un año determinado en relación con la acumulación normal y la intensidad de una tormenta específica.

La licuación puede suceder en zonas de arenas limosas saturadas o en arenas muy finas redondeadas bajo el nivel freático, la cual tendrá como resultado una falla tipo flujo. Esa se refiere a movimientos más o menos rápidos con un comportamiento semejante a un líquido viscoso que puede presentarse por un exceso de presiones de poros, donde la superficie de falla no es distinguible y se desarrolla durante un lapso relativamente breve.

La licuación es un fenómeno que consiste en una caída brusca de resistencia al corte de un suelo granular en condiciones no drenadas. Esta se activa en sismos que vibran el terreno generando pequeños incrementos o decrementos de esfuerzos de corte de manera repetitiva.

Así, son más susceptibles a licuación las arenas finas limpias y las arenas limosas no-plásticas, las cuales contienen menos del 10% de finos, porque presentan una tendencia a depositarse de una manera suelta y presentan una permeabilidad baja para impedir el drenaje durante las vibraciones del terreno (sismos).

El Perú, tiene áreas que presentan suelos arenosos colapsables, expansivos y de rellenos sueltos que deben ser estudiados, porque probablemente presentarán problemas de deformación por cambio de volumen y por presencia de filtraciones de agua en exceso del contenido de humedad natural. Generalmente son suelos de origen eólico con estructura cementada por sales adquiridas por la brisa marina lo que le da una resistencia aparente, pero una estructura inestable. Estos suelos se encuentran en áreas áridas y son cementados por sales solubles que sufren grandes asentamientos por lixiviación de dichos materiales, lo cual se manifiesta en asentamientos bruscos.

Estos suelos tienen una densidad y un grado de saturación bajos. Estos exhiben una cohesión temporal como resultado de la presencia de materiales cementantes como yeso o carbonato de calcio. En general, los cambios de algunos factores como la humedad y el electrolito en sí son los que afectan la matriz del suelo y producen el cambio de volumen o colapso. Con esto, se puede concluir que la causa desencadenante es la presencia de agua con un esfuerzo significativo aplicado.

Los mecanismos de colapso más frecuentes en suelos granulares secos son la disolución de la cementación por sales solubles o la destrucción. En suelos granulares muy húmedos, el colapso se debe a la pérdida de la resistencia al corte temporal entre los granos dada por la tensión capilar entre ellos.

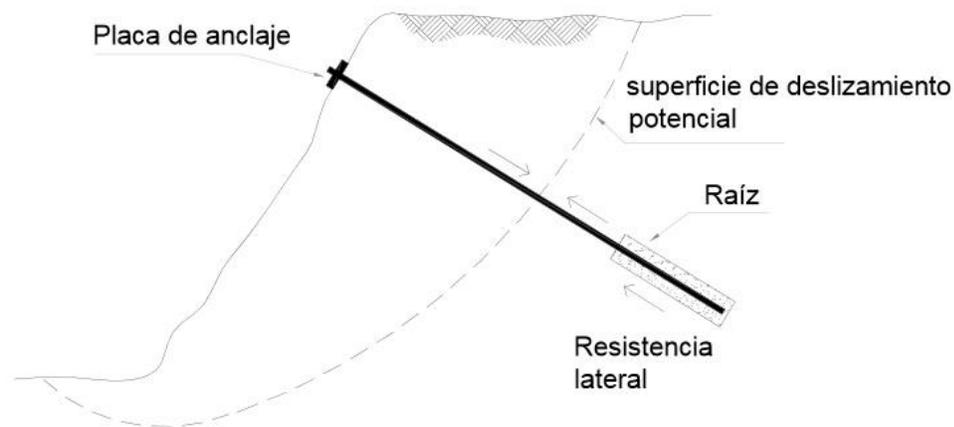


Figura 2. 3 Mecanismo básico de un anclaje.³

2.3 Partes de un anclaje

Se pueden dividir en tres zonas:

- Zona de anclaje
- Zona Libre
- Cabeza y Placa de apoyo

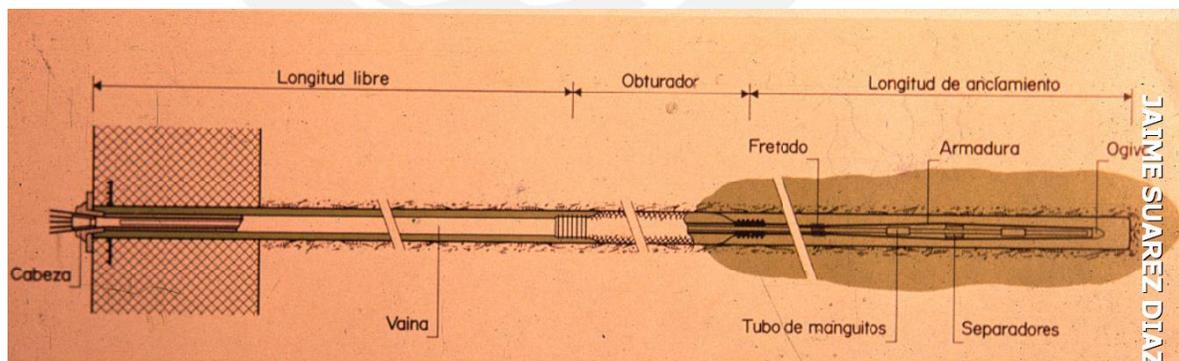


Figura 2. 4 Partes de un Anclaje.⁴

³ PÉREZ, María. *Anclajes y Sistema de Anclajes*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional. Buenos Aires, Noviembre 2004.

⁴ SUAREZ, Jaime (s.f). *Seminario de Estructuras de Contención*. [diapositivas de PowerPoint].

La **zona de anclaje** es la parte solidaria al terreno y es la encargada de transferir los esfuerzos al mismo. Se efectúa mediante inyecciones de lechada, generalmente a base de cemento con relaciones de cemento/agua entre 1.5 y 2. También, se emplean en algunos casos inyecciones de mortero de cemento.⁵

La inyección se lleva a cabo a través de tuberías de PVC y es frecuente inyectar a presión, alcanzándose valores de hasta 3MPa. En este caso, es necesario separar la zona de anclaje de la zona libre y evitar que ésta se cimente con la lechada. Cabe señalar que es permitido y además ventajoso el emplear aditivos que aceleren el fraguado y disminuyan la retracción.

Se llama bulbo de anclaje al material (cemento, mortero o resina) que recubre la armadura y que la unifica al terreno que la rodea. Es importante resaltar que es de suma importancia lograr una buena materialización del bulbo de anclaje, la cual se hace muy delicada cuando se trata de terrenos sueltos.

Es determinante proteger esta zona contra la corrosión, aunque hay algunas investigaciones de Schnabel 1982 que indican que el mortero o lechada de cemento es de gran utilidad para preservar la armadura frente a acción corrosiva formando una película pasiva de hidróxidos ferrosos (Fe(OH)), la cual evita la corrosión del acero.⁶ Según su investigación, varios anclajes permanentes instalados desde 1960 fueron protegidos únicamente con lechada de mortero de cemento. Así, se indica que no existe evidencia de que hayan fallado por corrosión.

Sin embargo, también hay estudios, más recientes, de Merrifield, Barley y Von Matt (1997) que comprueban que de millones de casos analizados, por lo menos existen 35 casos de falla por corrosión. Así que no se puede decir con exactitud que este es un detalle a ignorar por completo, sino que se debe aplicar rigurosamente las especificaciones concernientes al diseño e instalación de los anclajes. Es por tal motivo que el British Standard Institute de Inglaterra concluye que la lechada de cemento en la zona de anclaje no se debe considerar como única protección contra la corrosión y se debe utilizar doble barrera protectora a través de una vaina corrugada interna y externa.⁶

La resistencia de la **zona de anclaje** está determinada por la adherencia existente entre lechada de cemento y el acero, y también por la adherencia entre el bulbo de anclaje y el terreno que lo rodea, que es lo que determina la resistencia en sí.

⁵ AYALA, F, et al. *Manual de taludes*. Instituto Geológico y Minero de España. 1987, p. 456.

⁶ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid 2004, p.45

Tipo de terreno	Resistencia media al deslizamiento (MPa)
Rocas duras (granito, gneis, caliza)	1,00 a 2,50
Roca floja	0,30 a 1,00
Gravas y arenas gruesas	0,70 a 1,00
Arenas medias y finas	0,30 a 0,60
Arcillas con resistencia a la compresión simple:	> 0,80
≥ 0,4 MPa	0,40 a 0,80
0,10 a 0,40 MPa	0,25 a 0,40
0,05 a 0,10 MPa	

Tabla 2. 1 Resistencia media al deslizamiento de bulbos inyectados⁷

La **zona libre** corresponde a la parte en la cual la armadura metálica se encuentra separada o independizada del terreno que la rodea, lo que permite deformarse con plena libertad al ponerse en tensión.

Esta parte metálica se encuentra cubierta o mejor dicho protegida por una vaina o camisa de PVC. Adicionalmente, esta armadura debe protegerse de la corrosión utilizando rellenos de productos protectores.

Se considera que esta zona debe tener una longitud mínima de 6 m. más que nada por razones constructivas con el objetivo de controlar de manera adecuada la puesta en tensión y así poder minimizar la influencia de los movimientos de la cabeza.

La **cabeza y placa de apoyo** es el sistema de abroche de la armadura, el cual puede estar constituido por tuercas en el caso de barras roscadas o bien remachadas o conos macho-hembra para alambres y cordones, dicho abroche puede ser común al conjunto de la armadura o independiente para varios elementos. La placa de apoyo suele situarse sobre un bloque de hormigón armado que transmite los esfuerzos a la superficie del terreno. Finalmente, la puesta en tensión de los cables se efectúa normalmente mediante gatos.⁸

⁷ JIMENEZ, J. & MUZAS, L. *Geotecnia y Cimientos III*. Madrid, 1980.

⁸ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid 2004, p. 46

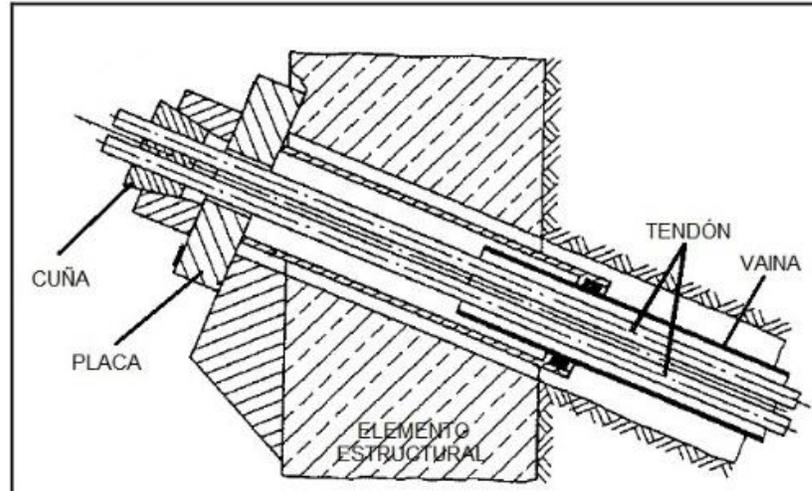


Figura 2. 5 Cabeza y Placa de apoyo⁹



Figura 2. 6 Vista transversal de la zona libre y de la zona de bulbo¹⁰

⁹ CORTEGANA, Ethelbina. *Descripción teórica de las calzaduras y muros anclados en la grava de Lima*. Diss. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Civil, 2012, Figura 4.4.2.c.

¹⁰ CORTEGANA, Ethelbina. *Descripción teórica de las calzaduras y muros anclados en la grava de Lima*. Diss. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Civil, 2012, Figura 4.4.2.b.

2.4 Anclajes temporales Pos Tensados (técnica tradicional)

Es importante señalar que los anclajes pueden dividirse en tipos. Según su aplicación en función del tiempo de servicio, se distinguen dos tipos: temporales y permanentes. También, se dividen en función de su forma de trabajar: pasivos, activos y mixtos.

De esta forma, Se conoce como **anclaje pasivo** a aquel cuya armadura no se pretensa después de su instalación. El anclaje entra en tracción al empezar a producirse la deformación de la masa de suelo. En cambio, los **anclajes activos** son aquellos que una vez instalados se pretensa la armadura hasta alcanzar su carga admisible, comprimiendo el terreno comprendido entre la zona de anclaje y la placa de apoyo de la cabeza. Finalmente, los **anclajes mixtos** son aquellos a los cuales su estructura metálica se pretensa con una carga menor a la admisible, quedando una fracción de su capacidad resistente en reserva para hacer frente a posibles movimientos aleatorios del terreno.

Se considera **anclaje temporal** a todo aquel anclaje con un periodo de servicio limitado, menor a 2 años o 18 meses aproximadamente. Se utiliza mientras se está realizando la excavación para contenerla mientras se construye algún otro elemento estructural que cumpla la función de asumir las cargas (comúnmente las losas entre piso serán las que constituirán los próximos elementos estructurales de soporte de muros). Debido a este corto periodo de tiempo de interacción con el suelo, se considera también para el diseño de estos anclajes temporales un sistema anticorrosión mucho más sencillo que para el caso de anclajes permanentes. Estos últimos tendrían una estimación de vida mayores a dos años, por lo que interactuarán más tiempo con la probable agresividad del terreno

En Lima, ya es popular el anclaje temporal pos tensado. Es posible observar que un porcentaje elevado de anclajes se proyectan y se ejecutan con esta técnica. Hasta se podría decir que ha sido elegida como una de las técnicas preferidas por distintas empresas, tanto proyectistas como ejecutantes, para realizar los trabajos de estabilización de excavaciones profundas en zonas urbanas. Esto debido a las ventajas que presenta con respecto a costos, tiempos y seguridad. No obstante, es muy importante mencionar, también, que esto se debe principalmente a las características del proyecto en sí (como la profundidad de la obra, el área delimitada del terreno, diseño estructural) y también a las que presenta el suelo donde se construirá con esta técnica como por ejemplo parámetros de resistencia muy altos y sin presencia de nivel freático, que permiten la excavación sin generar desmoronamiento del terreno.

Estos muros reforzados con anclajes pos tensados, otorgan un alto grado de seguridad durante los trabajos de excavación, además de resistir los empujes laterales del suelo, las sobrecargas vecinas y controlar las deformaciones del suelo.

Todo el sistema del muro anclado pos tensado, consiste básicamente en un muro o placa de concreto, el cual puede contar con varios niveles de anclajes que se construirá por paños desde el nivel superior (nivel 0.0) hacia niveles inferiores y que obedecerán a un diseño estructural. Estos muros tienen en promedio 30cm de espesor, 3.00 a 3.5 m. de altura y 4.5 a 5.0 m. de largo con una malla de aceros de refuerzo con 50 cm. de acero sobresaliente al paño para futuros empalmes, dichos muros son vaciados in situ de manera continua y son los encargados de soportar las cargas laterales del terreno y las transmite al anclaje. Seguidamente, el sistema está constituido también por el sistema de anclajes, el cual está encargado de sostener el talud y permitir la excavación por debajo de él.

De esta manera, se puede decir que son **anclajes inyectados**, ya que este tipo de anclajes son armaduras metálicas alojadas en taladros perforados cementadas por la inyección de la lechada de cemento. El elemento estructural (el muro) es sometido a tracción, generando un esfuerzo de anclaje, el cual es soportado por la resistencia al corte lateral de la zona de inyección de contacto con el suelo. Las inyecciones se generan al final del bulbo bajo presiones mayores a 0.35MPa. Esto incrementa la presión normal de confinamiento e incrementa el diámetro del bulbo. Al final de la inyección, se formará un miembro empotrado en la parte más profunda del tirante metálico dentro de la perforación. Esto explica por qué las fuerzas que actúan sobre el anclaje inyectado no se transmiten al terreno en toda su longitud, sino solamente en el tramo de la zona inyectada.

Se recomienda este tipo de anclaje temporal inyectado por ser más adecuado para un suelo granular que presente cohesiones bajas.

El diseño de muros anclados se concentra en obtener, al final, la construcción de un muro que sea seguro frente a un rango de condiciones potenciales de rotura. Este diseño debe de limitar los movimientos del suelo y del muro aportando, asimismo, una base práctica y económica para la construcción.

La magnitud de la fuerza total de los anclajes requerida para mantener el muro en un estado de equilibrio se calcula en función de las fuerzas causadas por el suelo, el agua y los factores externos. Los anclajes deben aportar las fuerzas estabilizadoras requeridas que, a su vez, serán transmitidas al suelo a una distancia adecuada sobrepasando la zona activa de posible rotura originada por la carga del suelo. Esto significará que las fuerzas del anclaje también han de ser transmitidas hasta sobrepasar la zona activa, que generalmente define la distancia mínima al muro a la que se ha de disponer la zona del bulbo del anclaje.

La longitud del bulbo debe situarse, además, hasta una profundidad en el interior del suelo que no intercepte ninguna superficie potencial de rotura. La profundidad requerida a la que los anclajes deben de situarse en el suelo debe determinarse basándose en la localización de la superficie potencial de rotura más profunda. La superficie potencial de rotura del suelo que presente un factor de seguridad insuficiente de sostenimiento, sin considerar las fuerzas adicionales de los anclajes.

Cabe resaltar que independientemente de la técnica elegida, puede ser muy ventajoso, según sea el caso, la necesidad, y si las condiciones del proyecto lo permiten, emplear aditivos que aceleren el fraguado y disminuyan la retracción.

2.5 Anclaje Tirabuzón (Auto perforantes)

Este sistema adopta diferentes nombres como Anclajes tipo Perfo, Auto perforantes, Anclajes Helicoidales, Anclajes de Barra, Bulones o, como lo conocemos en este contexto, Anclajes Tirabuzón.

Este método es indudablemente el más versátil, pero también el más costoso. Es una forma de eliminar el sistema de inyección del mortero o lechada de cemento.

Este sistema se trata de anclajes de barras de acero–tubo roscado por laminación en frío, el cual trabaja como una sección de acero portante. Al mismo tiempo formarán parte de la armadura o elemento longitudinal que se traccionará. Finalmente, un cuerpo de cemento perimetral, con calidad mínima, cubrirá al sistema, que transmite las cargas de tracción y/o compresión principalmente por rozamiento desde dicha barra a través del cuerpo de inyección al suelo. Se componen de un tubo de acero roscado, empalmado mediante pequeños mangos roscados externos con topes y juntas centrales, y provistas de una boca de perforación de un solo uso. El barrido de la perforación se efectúa con lechada de cemento que, a la vez, estabiliza el anular de la perforación, y satura el terreno de cemento. Finalmente, actúa como inyección; es decir, como un auto inyección simultánea a la perforación.

En las figuras 2.7 y 2.8, se observa un esquema básico, donde resaltan las partes de un anclaje anteriormente ya mencionadas.

La cabeza está compuesta por una placa y una tuerca (hexagonal y base esférica), lo cual permite la fijación exterior del anclaje al terreno y, por ende, la cabeza de la placa cumple la función de transmitir las fuerzas de tracción generadas.

La barra puede ser roscada o corrugada, siendo esta última de una calidad inferior. Esta barra se introduce en el terreno a lo largo del eje del taladro con la ayuda de separadores o centradores de PVC, que permiten que la lechada de inyección la rodee completamente. Además, en este sistema es frecuente inyectar a presión, alcanzándose valores de hasta 3Mpa. En este caso, es necesario separar la zona de anclaje de la zona libre y evitar que se cimente con la lechada.

En su longitud libre, se encuentra protegida por una vaina lisa, lo cual le permite inyectar al taladro en toda su longitud sin que se fije al terreno en una parte no deseada.

En la zona del bulbo, la barra se encuentra en contacto directo con la lechada de inyección que se fija al terreno.



Figura 2. 7 Tipos de Barras de anclaje¹¹

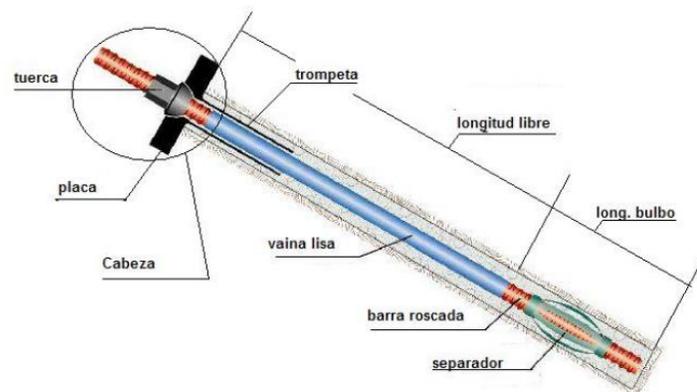


Figura 2. 8 Partes de un anclaje tirabuzón (Provisional)¹²

Para colocar el mortero, se utilizan dos semicilindros de chapa perforadas que una vez rellenos de mortero se introducen en el barren. Posteriormente, se inserta la barra de acero, desplazando lateralmente el mortero, el cual penetra en el espacio anular, adaptándose perfectamente a todas las irregularidades. Esto garantiza una buena adherencia de los barrenos. Los anclajes de este tipo se construyen en longitudes de hasta 12 metros y para capacidades de carga de entre 120 a 200 KN. Sin embargo, a pesar de su versatilidad, por su rigidez pueden resultar inadecuados.

¹¹ MURILLO, T & ORTUÑO, L. *Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Anclajes y Bulones*. Recuperado de <http://www.urielysociados.es/img/formacion/ponencia1.pdf>.

¹² MURILLO, T & ORTUÑO, L. *Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Anclajes y Bulones*. Recuperado de <http://www.urielysociados.es/img/formacion/ponencia1.pdf>.

Los diámetros de barras más habituales son de 25, 32 y 40 mm. A continuación, se muestran unos datos sobre la calidad del acero.

Tipo de Barra	Límite Elástico (Mpa)	Carga de Rotura
Corrugada, Gewi o similar	500	550
Dywidag	850	1050

Tabla 2. 2 Características de barras de anclajes habituales.¹³

2.6 Suelo enclavado (“soil nailing”)

El Suelo enclavado tiene sus orígenes a raíz del método del túnel austriaco, el cual era un sistema para excavaciones subterráneas en rocas y consistía en acero de refuerzo pasivo en la roca seguido por aplicación de hormigón proyectado reforzado. La primera aplicación de Suelo enclavado propiamente dicho se puso en práctica en 1972 para un proyecto de ampliación de ferrocarril en Francia. Se utilizó para estabilizar una alta cuesta de 18 m. en suelo arenoso. Este método demostró ser mucho más rentable a la vez que disminuía considerablemente el tiempo de construcción.¹⁴

Debido al éxito que tuvo en Francia, el siguiente país en investigar fue Alemania de 1975 a 1981. En asociación con la Universidad Karlsruhe, se diseñaron y pusieron a prueba varios experimentos a gran escala con diferentes configuraciones y procedimientos y diseños. Por otro lado, Estados Unidos utilizó esta técnica por primera vez en 1976 para cimentación profunda de arenas limosas.¹²

El Suelo Enclavado es un método moderno para contención de cortes de suelos, lo cual le convierte en una de las primeras soluciones que se podría dar para la contención de cortes verticales auto-soportantes y estables en el tiempo. Este consiste en reforzar el suelo, reforzar un talud a medida que desciende la excavación mediante la introducción de anclajes de refuerzos pasivos o activos, que trabajan principalmente a tracción. Sin embargo, también pueden tomar cargas de flexión y corte, y se complementan con un paramento superficial que puede ser rígido o flexible que impide el deslizamiento del suelo entre los puntos que se encuentran las barras instaladas.

El sistema se caracteriza por emplear maquinaria ligera, rapidez frente a muros convencionales y estabilización progresiva de la excavación. No obstante, sí necesita que el terreno presente una cohesión suficiente para soportar las excavaciones parciales.

¹³ MURILLO, T & ORTUÑO, L. (2010). *Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Anclajes y Bulones*. Recuperado de <http://www.urielyasociados.es/img/formacion/ponencia1.pdf>

¹⁴ CARLOS A. Lazarte, et al. *Geotechnical Engineering Circular No. 7. Soil Nail Walls*. Estados Unidos, 2003.

Ventajas:

- Alta velocidad de ejecución, ya que la construcción del muro anclado acompaña prácticamente la excavación.
- Técnica flexible y fácilmente modificable.
- Versatilidad para adaptarse a las diferentes geometrías de los taludes. Se puede construir en taludes irregulares.
- Puede recibir vegetación.
- Ausencia de elementos de entibados o encofrados.
- Economía. Mayor rentabilidad.¹⁵

Clasificación:

- Anclaje Pasivo: Anclaje constituido por una o más barras. No posee longitud libre y generalmente no se pretensa.
- Anclaje activo: Barra o cable, con longitud libre y de bulbo. Elemento retensado.

Los anclajes del Suelo enclavado se basan en el refuerzo del terreno a medida que avanza la excavación mediante la perforación e instalación de pernos pasivos, los cuales trabajan fundamentalmente a la tracción y secundariamente al corte. La colocación de los pernos se realiza en pozos perforados y posteriormente se inyectan con lechada de cemento. Luego, los pernos se ejecutan en mallas que dependiendo del diseño y de las características del suelo se distancian entre sí 1.20 m. a 2.50 m. La cabeza de los pernos se une a una malla simple o doble, la cual se cubre con “shotcrete” u hormigón proyectado in situ.



Figura 2. 9 Anclajes “Soil Nailing”. Estación Los Orientales Metro de Santiago Línea 4¹⁶

¹⁵ PILOTES TERRATEST

Pilotes Terratest: Soil Nailing. Consulta: 27 de noviembre de 2014.

<http://www.terratest.com.pe/productos.php?id=13>

¹⁶ PILOTES TERRATEST

Pilotes Terratest: Soil Nailing. Consulta: 27 de noviembre de 2014.

<http://www.terratest.com.pe/productos.php?id=13>

3. CAPÍTULO 3: DISEÑO

3.1 Requisitos previos

3.1.1 Estudio de mecánica de suelos

Basados en la norma E.050 Suelos y Cimentaciones, el estudio de mecánica de suelos “se ejecutará con la finalidad de asegurar la estabilidad y permanencia de las obras y para promover la utilización racional de los recursos”. Cabe mencionar que dicha norma estipula en su artículo N° 3 la obligatoriedad de los Estudios para Edificaciones en general que alojen gran cantidad de personas, colegios, universidades, hospitales, clínicas, etc. Y cualquier edificación adyacente a taludes o suelos que puedan poner en peligro su especialidad.¹⁷

Se menciona, también, en su artículo N° 4 que los Estudios de Mecánica de Suelos (EMS) son aquellos que cumplen con la presente norma, que están basados en el metrado de cargas estimado para la estructura y que cumplen los requisitos para el Programa de investigación.

Entonces, un EMS permitirá definir las características geotécnicas del terreno y determinar los parámetros y propiedades que ayuden a comprender y definir su comportamiento. Un EMS se puede dividir en 3 etapas:

1. Trabajo de investigación en campo: Es en donde se encuentra inmersa el reconocimiento del lugar con intervención de topógrafos, geólogos, ingeniero de mecánica de suelos, entre otros; además de estudios de las características del suelo usando calicatas, sondeos, ensayos de penetración, ubicación del nivel freático (si existiese) hasta la profundidad necesaria, etc.
2. Ensayos de laboratorio: Pruebas realizadas a las muestras alteradas o inalteradas obtenidas en el sondeo.
3. Trabajo de gabinete: Resumen detallado del estudio geotécnico, definiendo el alcance y enfoque incluyendo topografía, estratigrafía del terreno, interpretaciones, cálculos, comentarios, recomendaciones con el diseño y construcción.

¹⁷ Norma Técnica de Edificaciones E.050 “Suelos y cimentaciones”. Reglamento Nacional de Edificaciones. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, 2015.

En el presente trabajo, se usarán perforaciones, las cuales son de diámetro pequeño que permitirán definir la estratigrafía del terreno. Dichas perforaciones serán a presión, debido que se está frente a casos de suelos blandos. Estos proveerán los siguientes propósitos:

1. Valores de SPT.
2. Muestras de suelos alterados e inalterados.
3. Observaciones de niveles freáticos.

El ingeniero responsable será el encargado de establecer el tipo, número, localización y profundidad de perforaciones dispuestas en el proyecto.

Para muros mayores de 30 metros de largo, las perforaciones deberían realizarse con una separación de 30 a 60 metros a lo largo de la ubicación del muro.

Para muros menores de 30, al menos una perforación será necesaria.

Cabe resaltar que, también, es necesario realizar perforaciones al frente y detrás de la ubicación propuesta del muro.



Figura 3. 1 Ubicación de las perforaciones cercanas a la propuesta del muro para el estudio de suelos.¹⁸

¹⁸ CARLOS A. Lazarte, et al. *Geotechnical Engineering Circular No. 7. Soil Nail Walls*. Estados Unidos, 2003.

Trabajo de investigación en campo:

Para el presente trabajo, es sumamente importante el ensayo de Penetración Estándar (SPT), el cual fue desarrollado en el año 1927 y consiste en contabilizar el número de golpes necesarios para introducir en el terreno una distancia de 30 cm mediante un martillo de 64 Kg. de masa desde una altura de 76 cm. Este ensayo ha sido normado por la ASTM D 1586-99 y la Norma Técnica Peruana NTP 339.133, tomando en cuenta de que no se debe ejecutar en el fondo de calicatas debido a la pérdida de confinamiento.

El SPT provee la medida de la densidad relativa de suelos granulares. Con ciertas limitaciones, el SPT puede proveer una estimación de la consistencia de suelos de grano fino, además de recuperación de muestras alteradas en la cuchara SPT.

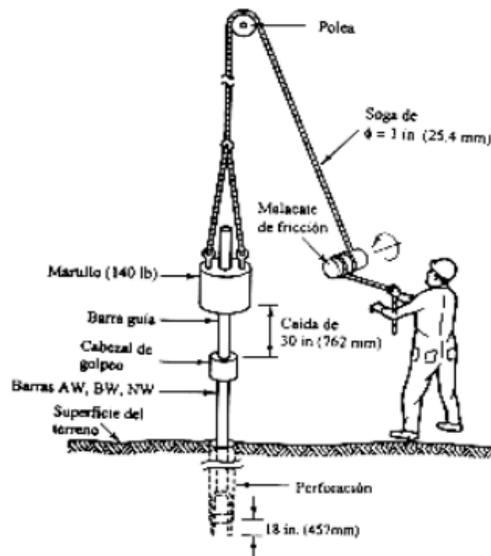


Figura 3. 2 Ensayo de Penetración Estándar (SPT)¹⁹

SPT y Densidad Relativa (suelos granulares)

	N (SPT)
Muy suelto	0 - 4
Suelto	4 - 10
Medianamente denso	10 - 30
Denso	30 - 50
Muy denso	> 50

Tabla 3. 1 SPT y Densidad Relativa para suelos granulares.²⁰

¹⁹ ZEGARRA, J., ZAVALA, G. *Mecánica de Suelos. Capítulo 7 Técnicas de Investigación del Suelo en el Campo*. Lima, 2011.

²⁰ ZEGARRA, J., ZAVALA, G. *Mecánica de Suelos. Capítulo 7 Técnicas de Investigación del Suelo en el Campo*. Lima, 2011.

Varios factores de correcciones son aplicados al número de golpes, N_{60} considerados para varios factores relacionados a la insuficiencia de energía y variaciones de procesos. N_{60} es obtenido para una energía eficiente de 60% definida como:

$$N_{60} = N * f_E * f_l * f_d * f_m$$

f_i : factores de Corrección que dependen de la Energía, longitud, diámetro, muestreador

Además, es muy importante en el trabajo de campo reconocer estructuras colindantes (si hubieran) y brindar todas las características básicas como tipo de estructuras, cantidad de pisos, existencia de estructuras subterráneas como sótanos o cisternas y la profundidad de la Napa freática si fuera el caso de presentarse.

Ensayos de laboratorio:

Ensayo	Norma aplicable
Contenido de Humedad	NTP 339.127 (ASTM D2216)
Análisis Granulométrico	NTP 339.128 (ASTM D422)
Límite Líquido y Límite Plástico	NTP 339.129 (ASTM D4318)
Peso Específico Relativo de los Sólidos	NTP 339.131 (ASTM D854)
Clasificación Unificada de Suelos SUCS	NTP 339.134 (ASTM D2487)
Corte Directo	NTP 339.171 (ASTM D3080)
Contenido de Sales Solubles Totales en Suelos y Agua Subterránea	NTP 339.152 (BS 1377)
Contenido de Cloruros Solubles en Suelos y Agua Subterránea	NTP 339.177 (AASHTO T291)
Contenido de Sulfatos Solubles en Suelos y Agua Subterránea	NTP 339.178 (AASHTO T290)

Tabla 3. 2 Ensayos de Laboratorio de Mecánica de Suelos.²¹

En el cuadro anterior, se observan las propiedades geotécnicas del suelo y su comportamiento obtenidas de los ensayos de laboratorio. Estos deben ser cuidadosamente evaluados, ya que el suelo provee tanto carga como soporte al sistema anclado.

Para el diseño de anclajes, necesitaremos los parámetros del ángulo de fricción interna del suelo (ϕ en grados $^{\circ}$), la cohesión del suelo (que para el caso de arenas se asume de manera práctica una cohesión $C = 0$), el Peso Unitario del suelo (γ) y la capacidad de carga última del suelo obtenidos de los ensayos de laboratorio.

²¹ Noma Técnica de Edificaciones E.050 “Suelos y cimentaciones”. Reglamento Nacional de Edificaciones. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, 2015.

Trabajo de Gabinete

Es la parte del proceso donde el Profesional Responsable (PR), recopilando todos los datos obtenidos en trabajo de campo y de los ensayos de laboratorio, realiza los cálculos necesarios para el diseño del anclaje propiamente dicho y el análisis de la viabilidad del mismo tomando las precauciones del caso con los factores de seguridad necesarios basados en las Normas Técnicas que regirán el proceso del diseño.

Con todo lo anteriormente explicado, es posible pasar al capítulo siguiente en el desarrollo del trabajo de gabinete donde analizaremos y realizaremos el diseño de un anclaje.

3.1.2 Programa de diseño Slope/W

Este es el programa Slope/W de GeoStudio, uno de los programas de cálculo más conocidos de estabilidad de taludes. Se usará el programa para analizar la estabilidad de talud, el cual es un problema básico y fundamental cuando se trata de anclajes. Para ello, hay una variedad de métodos entre los que podemos destacar los siguientes: Fellenius, Bishop, Janbu, Elementos finitos, entre otros.

Entre los beneficios que ofrece el programa para realizar la estabilidad de taludes, se puede mencionar los siguientes: adaptación a cualquier geometría y estratigrafía, análisis de terrenos parcialmente sumergidos, distintos sistemas de modelamiento de la superficie de rotura, modelamiento de las acciones del agua en el terreno, y modelamiento del comportamiento de los suelos de distintas formas como por tensiones totales, resistencia al corte, criterios de rotura específico y por los tipos de cargas actuantes como cargas superficiales, lineales, sísmicas, anclajes y bulones (activos y pasivos).

Entonces, a partir de aquí, se podrá empezar a introducir geometrías, mallas, parámetros y todos los datos necesarios para modelar el comportamiento de un talud y las características propias del suelo en cuestión (arenas), como el peso específico (γ), humedad (w), cohesión ($c=0$), ángulo de corte (ϕ) y el nivel freático.

3.2 Diseño de anclajes

Cuando se diseñan anclajes como sistemas de estabilización en suelos, se consideran tres aspectos importantes los cuales son los siguientes: el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, la superficie de falla plana y la fuerza de anclaje requerida para estabilizar la masa de suelo potencialmente deslizante (Barron et al, 1971). Es importante mencionar, también, que independientemente del método escogido, el ingeniero debe tener en cuenta las características geomecánicas del suelo. Además, debe tener presente las edificaciones adyacentes y los riesgos implicados en la excavación. De esta manera, no debe garantizar únicamente la estabilidad del soporte, sino también prestar atención al parámetro de controlar los movimientos del terreno. Eso permitirá salvar la integridad de las personas y de las construcciones involucradas en su desarrollo.²²

De este modo, el presente capítulo se basa en determinar la fuerza de anclaje requerida para estabilizar un suelo granular (arenas), cuya trayectoria de rotura es circular y, por ende, la superficie de falla está libre de escoger la línea de menor resistencia. Para esto, se debe considerar la movilización de la resistencia en el anclaje y en el suelo que se originan ante las cargas actuantes.

El suelo generará una demanda de empujes al igual que el agua (si hubiese), y las sobrecargas y las fuerzas de los anclajes serán las encargadas de estabilizar el sistema como manera de respuesta. Estas fuerzas actuarán por detrás del límite de la zona activa del talud, que será, finalmente, quien determine la longitud libre final del anclaje. Luego, una vez definida esta longitud libre del anclaje, se procederá a calcular la longitud del bulbo. Para ello, será necesario conocer la capacidad de adherencia entre suelo y lechada de cemento.

Previo al diseño, se debe tener ciertos criterios importantes de falla que principalmente son por motivos del anclaje, o también conocido como falla interna, entre los que se pueden identificar la falla del tendón, la falla entre lechada de cemento –suelo, falla entre tendón– lechada.

²² UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid 2004.

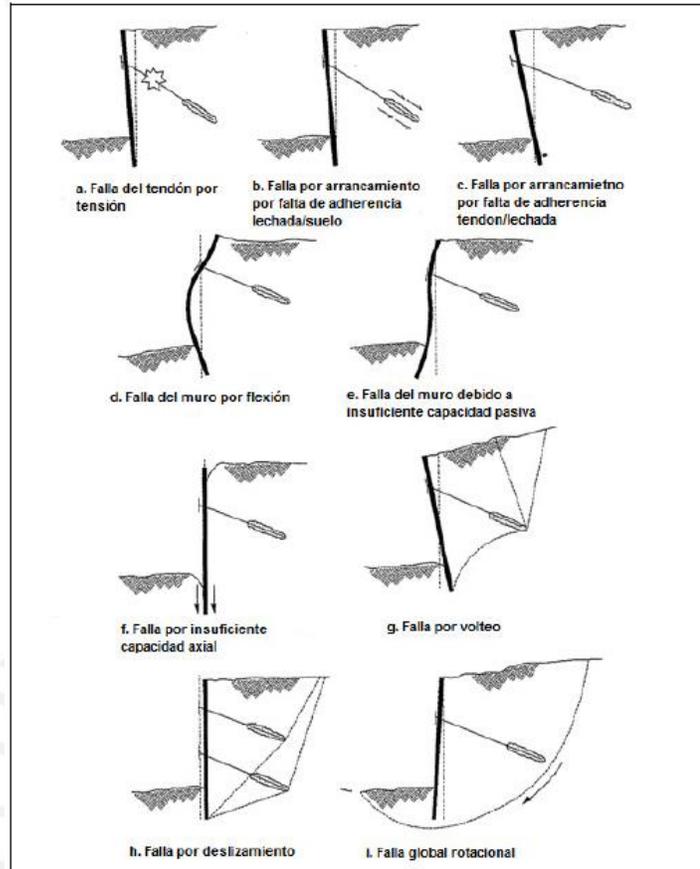


Figura 3.3 Criterios de Falla a considerar en el diseño de anclajes.²³

Cuando se realiza el diseño del anclaje se debe tomar en cuenta, además, la inclinación natural que debe tener todo anclaje, que dependerá del grosor del cable, la longitud libre y la longitud anclada.

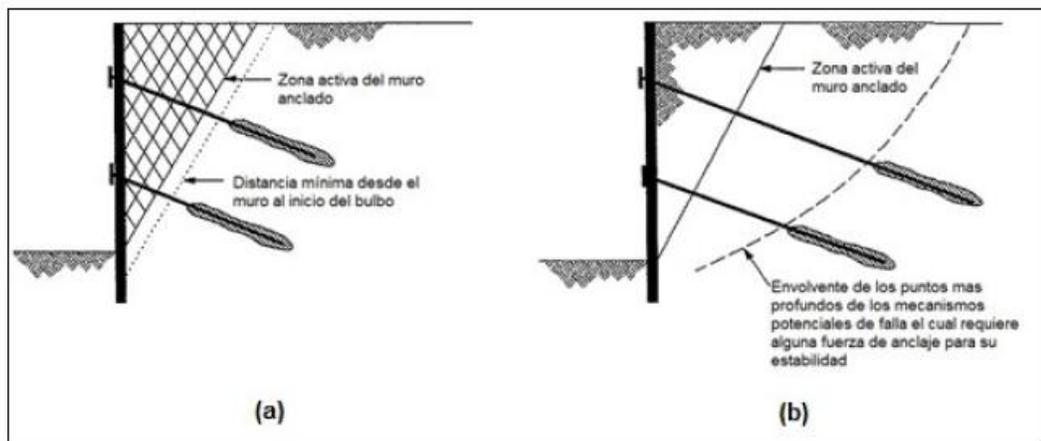


Figura 3.4 Fuerzas de anclaje transmitidas detrás de la zona de anclaje con la determinada inclinación.²³

²³ FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Geotechnical Engineering Circular N° 4. Ground Anchor and Anchored Systems*. Publication N°4. Atalanta, 1999.

Se puede establecer de manera general un procedimiento para realizar el diseño de anclajes con los siguientes pasos:

- a. Ubicación de la superficie potencial de falla
- b. Cálculo de cargas de los anclajes (basados en el diagrama de presiones).
- c. Diseño de la longitud libre.
- d. Diseño de la longitud del bulbo.
- e. Carga permisible para tensión.
- f. Espaciamientos entre puntos.

Para el caso de anclajes pasivos pos-tensados con tendones de cables de acero, conforme a norma ASTM A 416, deben ser de bajo grado de relajación y no deben ser soldados, así como presentar las siguientes características:

- i. Diámetro de 0.6"
- ii. Área nominal de 140 mm²
- iii. Módulo de elasticidad de 195 GPa
- iv. Resistencia a la tracción de 1860 MPa
- v. Límite elástico de 1670 MPa
- vi. Carga de fluencia 233.8 KN
- vii. Carga de rotura 260.4 KN

En cuanto a la lechada empleada en la inyección de anclajes, esta debe tener la capacidad de brindar una protección a través de una resistencia de 21MPa al momento que se realizará el tensado del anclaje con una relación de agua cemento (W/C por sus siglas en inglés) de 0.5 (PTI, 2004), la cual se logrará con 7 días de fragüe si se utiliza cemento tipo I.

El cálculo de la resistencia del arrancamiento del bulbo (q_s) o valor de la fuerza de fricción lateral, se obtendrá por el método de ábaco de Bustamante (1988). Para ello, se necesita ingresar con el valor del N_{spt} y con el tipo de inyección de la lechada (IGU), con lo cual se obtendrá el valor de q_s .

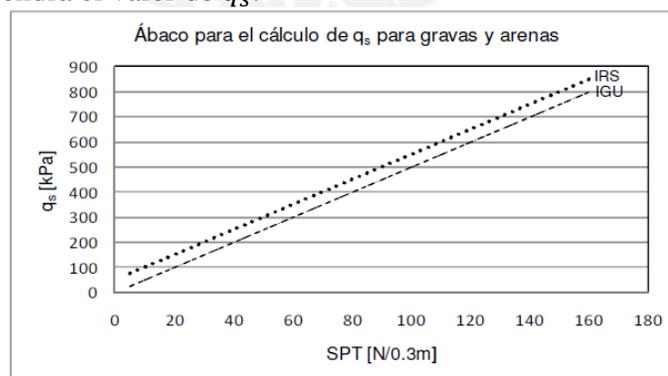


Figura 3. 5 Abaco de Bustamante para la resistencia de arrancamiento del bulbo.²⁴

²⁴ BUSTAMANTE, Michel. *Un método para el cálculo de los anclajes y de los pilotes inyectados*. París, 1988.

De la misma fuente, se puede calcular la capacidad de fricción lateral del bulbo con la siguiente ecuación propuesta por Bustamante²⁴:

$$F_l = \alpha * D_d * \pi * q_s$$

Donde:

α : 1.35, coeficiente de mayoración intermedio con IGU (1.30 a 1.40)

D_d : 0.123m, diámetro de perforación

q_s : fuerza de fricción lateral basada en la resistencia del suelo (dependerá del valor del N_{spt})

Cálculo de empujes

Se usará el método de Rankine, el método de Coulomb o el método de la Espiral Logarítmica. Para ello, se debe evaluar sus estados de carga que dependen básicamente del desplazamiento del muro anclado y encontraremos empujes en estado estático (empuje activo y pasivo).

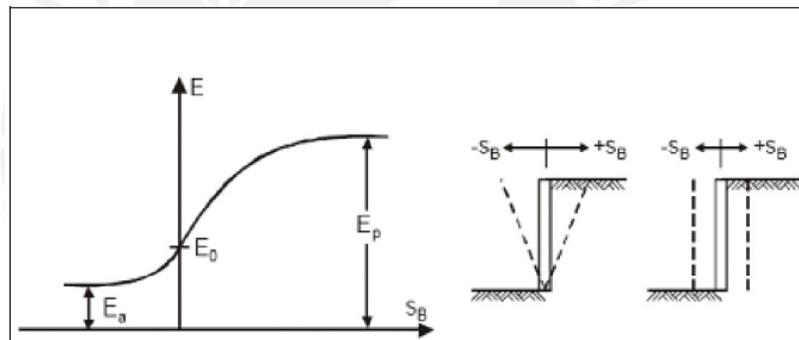


Figura 3. 6 Variaciones del empuje del suelo en distintos estados.²⁵

El empuje que se calcula es sumamente importante para el cálculo de las fuerzas de trabajo (F_w) de los anclajes.

Si la cimentación de una estructura es sensible a las deformaciones, el aporte del empuje en reposo es mayor. En el caso de que el muro anclado esté ubicado al lado de la cimentación de una estructura histórica (la cual soporta límites muy bajos de deformación) el coeficiente de ponderación para el coeficiente de empuje en reposo es 0.75, y el coeficiente de ponderación para el empuje activo es 0.25. Para el caso de edificios de concreto armado (en donde los límites de deformación de la cimentación son moderados), el coeficiente de ponderación tanto para el empuje en reposo y activo es de 0.50. Es decir, ambas participarán en igual proporción.

²⁵ CORTEGANA, Ethelbina. *Descripción teórica de las calzaduras y muros anclados en la grava de Lima*. Diss. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Civil, 2012.

Para estimar lo mencionado anteriormente, se presentan los factores de ponderación de empujes de suelo:

ESTRUCTURA VECINA	COEFICIENTES DE PONDERACIÓN	
	ESTADO ACTIVO	ESTADO DE REPOSO
	f de k_{Ah}	f de k_{Oh}
Estructuras históricas y sensibles a las deformaciones	0.25	0.75
Edificios de concreto armado	0.50	0.50
Terrenos sin estructuras	1.00	1.00

Tabla 3. 3 Coeficientes de ponderación para empujes.²⁶

Cabe resaltar que se considerará para el caso sísmico el valor del empuje activo igual al valor del empuje activo del caso estático.

Cálculo de coeficientes de empuje de suelo

– Estado Activo

Se calcula el empuje del suelo en estado activo. Los empujes se definen de acuerdo a los parámetros geotécnicos del suelo y a la geometría del talud.

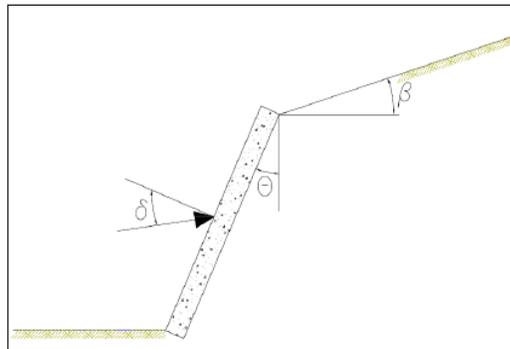


Figura 3. 7 Ángulos considerados para el empuje activo y de reposo.²⁷

θ : Ángulo que forma la pared interior del muro con la cara vertical

δ : Ángulo de fricción entre el muro y el suelo

β : Ángulo que forma la superficie del suelo con la horizontal

²⁶ CORTEGANA, Ethelbina. *Descripción teórica de las calzaduras y muros anclados en la grava de Lima*. Diss. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Civil, 2012.

²⁷ Fuente Propia.

Para el cálculo se tiene por el efecto del peso propio del suelo según la Norma DIN²⁸ 4085, el cual presenta el método de Coulomb; los empujes, que se definen de acuerdo a los parámetros geotécnicos del suelo; y a la geometría del talud. Se tiene:

$$k_A = \frac{\cos(\phi - \theta)^2}{\cos(\theta)^2 \cdot \cos(\delta + \theta) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\delta + \phi) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\cos(\delta + \theta) \cdot \cos(\beta - \theta)} \right]^2}$$

$$k_{\gamma Ah} = \frac{\cos(\phi - \theta)^2}{\cos(\theta)^2 \cdot \cos(\delta_A + \theta) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\delta_A + \phi) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\cos(\delta_A + \theta) \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \cos(\beta - \theta)} \right]^2}$$

$$k_{A\gamma h} = 0.1667$$

Mientras que el empuje del suelo en estado pasivo o de reposo según la teoría de Jaky, generalizada por Franke para presencia de talud, responde a la siguiente ecuación:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi + (\cos \varphi + \sin \varphi) * \frac{\beta}{\varphi}$$

Y al reemplazar valores obtenemos:

$$K_0 = 0.3309$$

Ahora habrá que considerar los coeficientes del empuje activo incrementado de suelo. Estos se obtienen de la siguiente fórmula:

$$K_{Ahi} = (1 - f) * k_{Ah} + f * K_0$$

Se considera que en el Perú la construcción vecina más común para sótanos es de concreto armado; por ende, el factor de ponderación (f) que se aplicará en la fórmula será de 0.5 (valor obtenido de la tabla 5 del presente trabajo), lo cual da como resultado:

$$K_{Ahi} = 0.2488$$

Mientras que para el estado sísmico será el mismo valor.

²⁸ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (INSTITUTO ALEMÁN DE NORMALIZACIÓN) DIN 4085. *Subsoil: Analysis of Earth pressure, basic principles for calculation*. Berlin, 1990.

La distribución Horizontal de anclajes será de la siguiente manera:

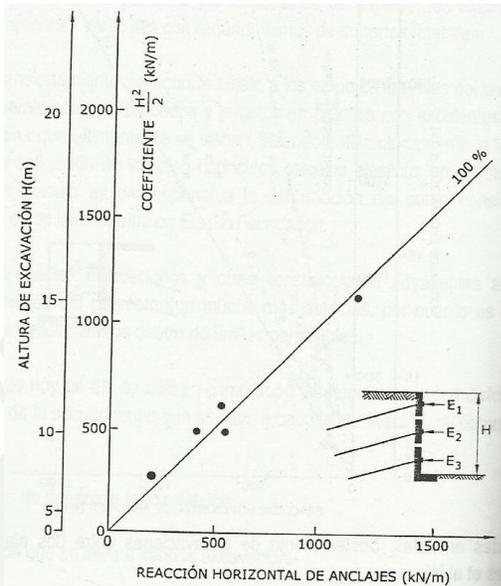


Figura 3. 8 Muros anclados por sistemas descendentes.²⁹

Un procedimiento de cálculo muy utilizado en Europa para diseñar la estabilidad de muros anclados se basa en la técnica propuesta por Kranz. De esta forma, Ranke y Ostermayer proponen un análisis de cálculo práctico siguiendo los conceptos de Kranz con anclajes múltiples.

Kranz analiza la rotura producida a lo largo del plano de deslizamiento profundo, tomando en cuenta el equilibrio de la cuña, la cual está delimitada por el muro, la superficie exterior, la superficie profunda de deslizamiento y una pantalla ficticia vertical.

La pared de anclaje ficticia está demarcada por la superficie exterior del terreno y el plano de deslizamiento profundo que atraviesa el centro de transmisión de los esfuerzos de anclaje al terreno. El centro de la transmisión de tensiones se considera el punto medio de la longitud mínima de empotramiento calculada. Por otro lado, la línea de deslizamiento (superficie de rotura interna) se toma recta y limitada por el pie del muro en caso de apoyo libre o por el punto al que corresponde el momento de empotramiento máximo si fuera el caso.

²⁹ MUZAS, F., et al. *Cimentaciones Urbanas- Calidad y Moderna Tecnología*. Boletín N° 7. Laboratorio del transporte y mecánica del suelo. Madrid, 1975.

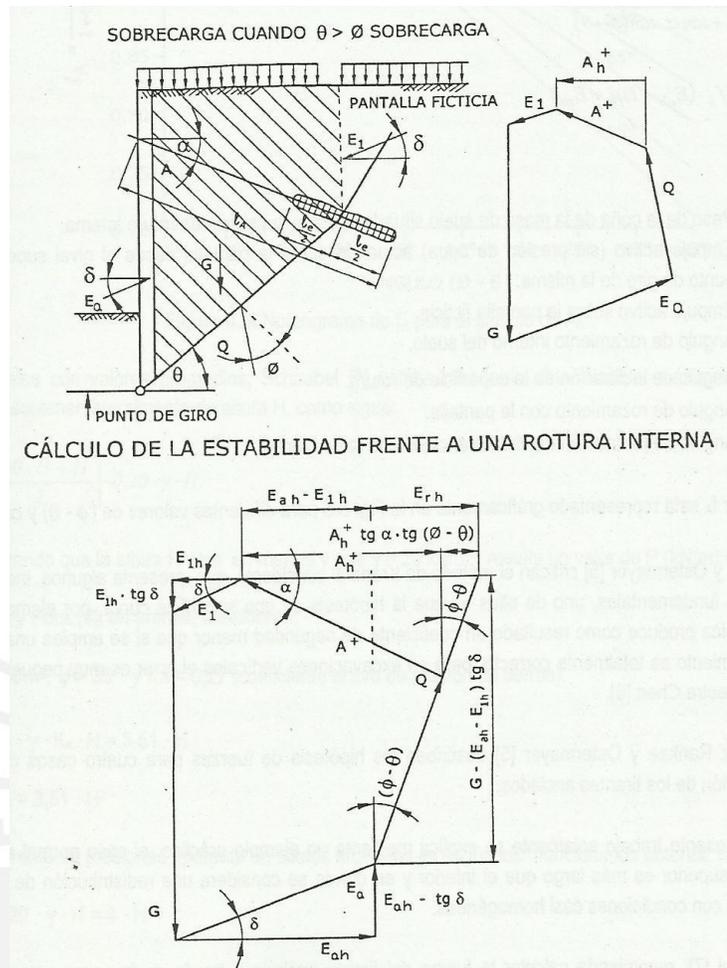


Figura 3.9 Equilibrio de la cuña de la masa de suelo para obtener el polígono de fuerzas.³⁰

De esta figura, se puede determinar el valor máximo posible de la fuerza del tirante anclado A.

El factor de seguridad lo define Kranz como el cociente entre la fuerza del tirante anclado máxima (obtenida de la cuña) y la movilizaba, es decir:

$$n = \frac{A_h^+}{A_h}$$

³⁰ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid, 2004.

Se obtiene a través del polígono de fuerzas la siguiente expresión:

$$E_{rh} = (G - (E_{ah} - E_{lh}) * \tan \delta) * \tan(\varphi - \theta)$$

$$f_A = \frac{1}{1 + \tan \alpha * \tan(\varphi - \theta)}$$

$$A_h^+ = f_A * (E_{ah} - E_{lh} + E_{rh})$$

Donde:

- G: Peso de la cuña de la masa de suelo sobre la superficie de rotura interna
- E_{ah} : Empuje activo (sin presión de agua) sobre la pantalla desde el nivel superior hasta el punto de giro de la misma
- E_{lh} : Empuje activo sobre la pantalla ficticia
- φ : Ángulo de rozamiento interno del suelo
- θ : Ángulo de inclinación de la superficie de rotura
- δ : Ángulo de rozamiento con la pantalla
- α : Ángulo de inclinación del tirante anclado con la horizontal

Mientras que el factor f_A está representado gráficamente en la siguiente figura para valores diferentes de $(\varphi - \theta)$:

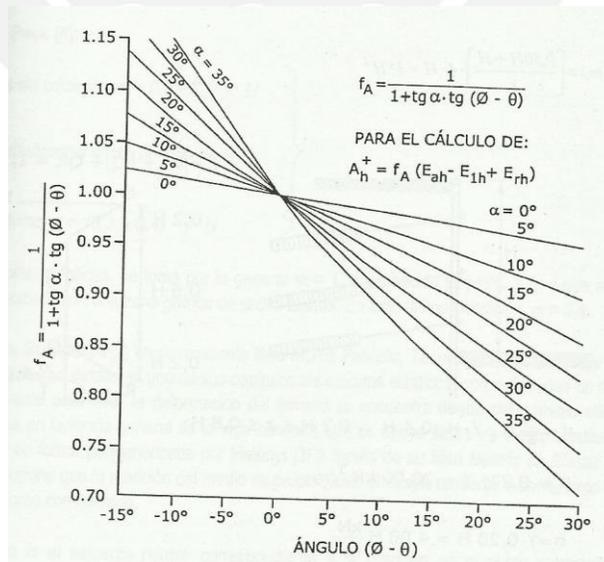


Figura 3. 10 Nomograma de f_A para el cálculo de A_h^+ .³¹

³¹ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid, 2004.

Schnabel recomienda calcular la fuerza del tirante anclado a través de la envolvente aparente de presiones y la compara con la metodología de Terzaghi y Peck.

Para suelos con valores promedios, Schnabelestima razonable determinar el máximo empuje en muros a sostener lateralmente de altura H, como a continuación:

$$P = \left(\frac{0.6 \cdot H + H}{2} \right) \cdot 0.2 \cdot \gamma \cdot H$$

Considerando que la altura H está en metros y que $\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$, resulta un valor de P (KN/m) = $3.20 \cdot H^2$

Terzaghi y Peck consideran para el caso de arenas:

$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$, $\phi = 35^\circ$ y $K_a = 0.27$ (Coeficiente activo de presión de tierras).

$$\sigma = 0.65 \cdot \gamma \cdot K_a \cdot H = 3.51 \cdot H$$

$$P \text{ (KN/m)} = 3.51 \cdot H^2$$

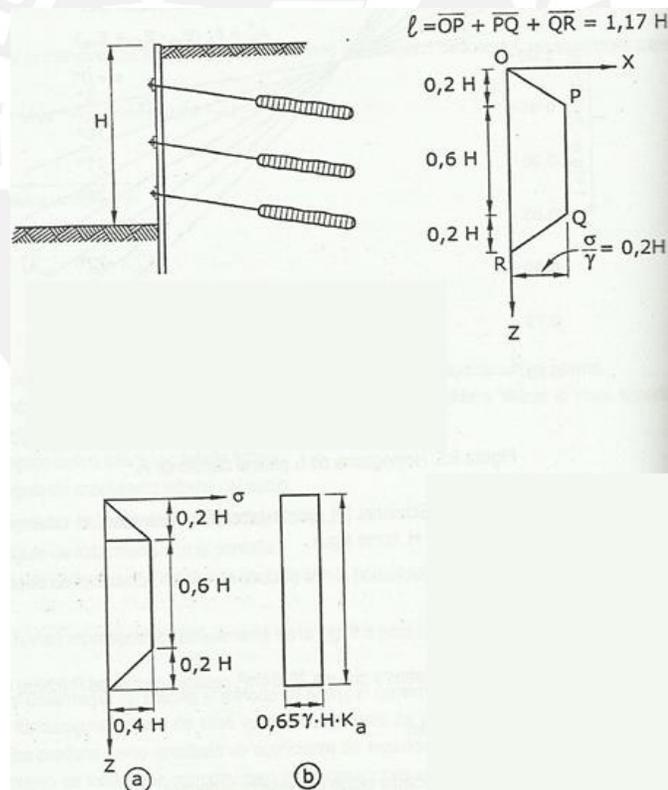


Figura 3. 11 Comparación entre diferentes envolventes de esfuerzos aparentes (a) Schnabel, (b) Terzaghi y Peck en arenas.³²

³² UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid, 2004.

En resumen:

Por el método de Schnabel:

$$\sigma = \frac{3}{4} * K_a * \gamma * H$$

$$\sigma = 0.2 * \gamma * H, \text{ al considerar que } K_a = 0.27$$

$$\sigma = 4 * H, \text{ H en metros y } \sigma \text{ en } \text{KN/m}^2$$

$$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$$

Por el método de Terzaghi y Peck:

$$\text{Terrenos sin cohesión } \sigma = 0.65 * K_a * \gamma * H$$

Se desarrolla el diseño de un muro de contención con anclajes de tres niveles para una excavación de 12.50 metros de profundidad. Esto se realiza con el método analítico de Kranz:

- Parámetros:
 - Arena media a gruesa
 - ϕ : Ángulo de fricción interna = 32.50°
 - γ : Peso Unitario 1.90 KN/m^3
 - δ : Ángulo de rozamiento del terreno con el muro = $\frac{2}{3} \phi = 21.7^\circ$
 - K_a = Coeficiente activo de presión de tierras = $\frac{1}{4}$
 - K_p = Coeficiente activo de presión de tierras 7.10
 - q : Sobrecarga = 10 KN/m^2
 - H: Altura del muro = 12.50 m.
- Cálculo de los esfuerzos sobre el muro

$$\sigma_h = q * K_a + \gamma * H * K_a \text{ (presión a la profundidad } z=H \text{ en la base de la excavación)}$$

$$\sigma_{h=z=12.50} = 61.90 \text{ KN/m}^2$$

El Empuje total es por lo tanto:

$$E_{ah} = \left(\frac{q * K_a + \gamma * H * K_a}{2} \right) * H$$

$$E_{ah} = \left(\left(\frac{q}{H} \right) + \frac{\gamma}{2} \right) * K_a * H^2$$

$$E_{ah} = 402.30 \text{ KN/m}$$

Entonces, se tiene que la presión horizontal promedio para una distribución rectangular (Terzaghi y Peck) es la siguiente:

$$\frac{E_{ah}}{H} = 32.2 \text{ KN/m}$$

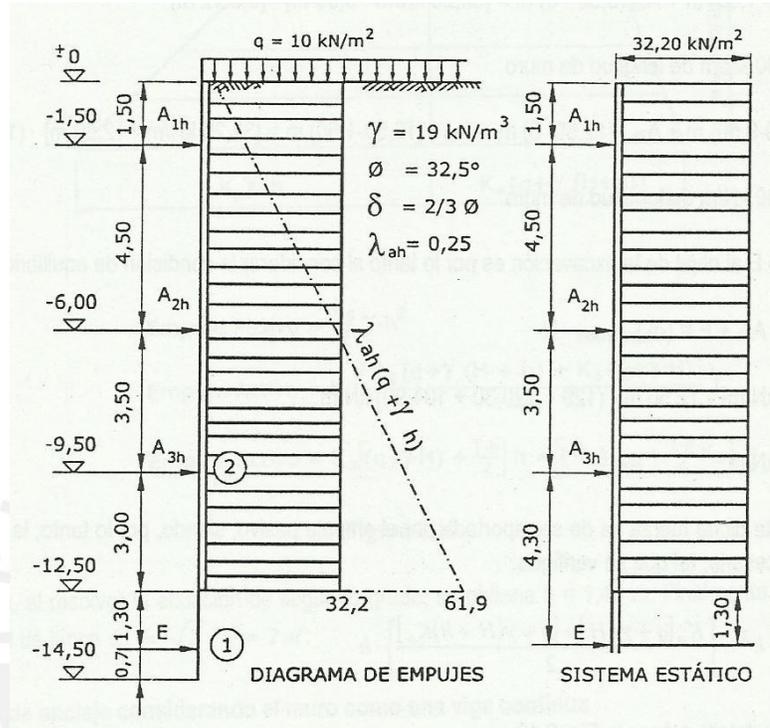


Figura 3. 12 Diagrama de empujes.³³

- Determinación de la fuerza de anclaje

Suponiendo que los momentos flectores sobre el muro son nulos al nivel de los anclajes, se permite que el sistema arroje los siguientes valores para las fuerzas de anclajes:

$$A_{1h} * (6 - 1.5)m = \left(32.2 \frac{KN}{m} * 6m \right) * \left(\frac{6}{2} m \right)$$

$$A_{1h} = 129 \text{ KN/m de longitud de muro}$$

$$A_{1h} * (9.5 - 1.5)m + A_{2h}(9.5 - 6)m = \left(\frac{32.2KN}{m} * 9.50 \right) * \left(\frac{9.5}{2} m \right)$$

$$A_{2h} = 120.3' \text{ KN/m de longitud de muro}$$

³³ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid, 2004.

$$A_{3h} * (12.5 - 9.5)m + A_{2h} * (12.5 - 6)m + A_{1h} * (12.5 - 1.5)m = (32.2\text{KN/m} * 12.5\text{m}) * (12.5/2)$$

$$A_{3h} = 104.9 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \text{ de longitud de muro}$$

Considerando la condición de equilibrio, el esfuerzo E es igual a:

$$A_{1h} + A_{2h} + A_{3h} + E = (\sigma_h)_{\text{promedio}} + H$$

$$E = 32.2 \text{ KN/m}^2 * 12.5\text{m} - (129 + 120.3 + 104.9) \text{ KN/m}$$

$$E = 48.3 \text{ KN/m}$$

De esta forma, esta fuerza debe ser adoptada completamente por el empuje pasivo

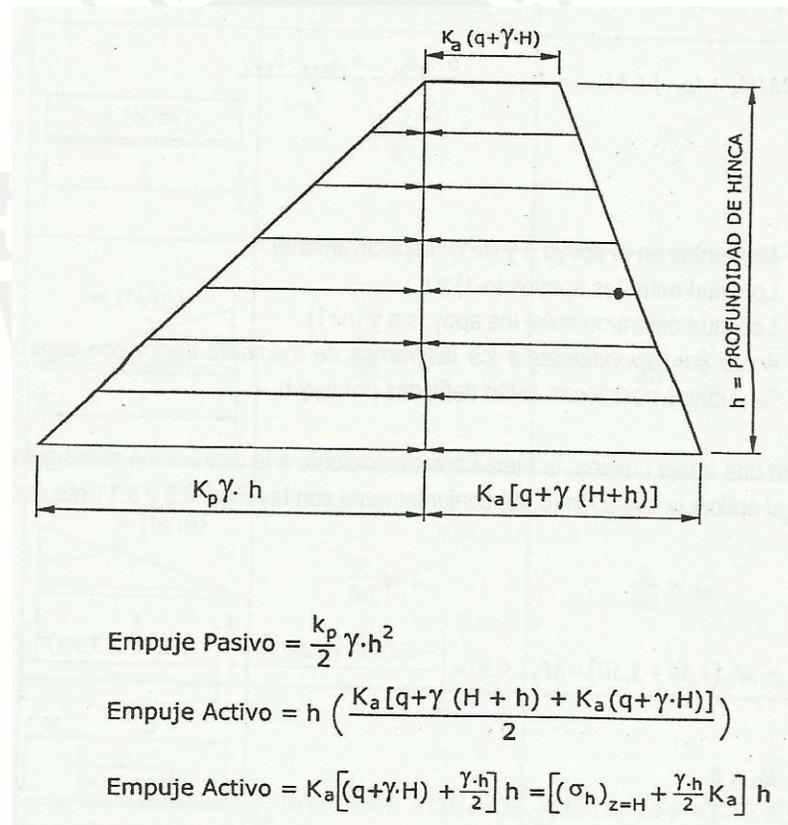


Figura 3. 13 Empuje pasivo para cálculo de la profundidad de hinca.³⁴

³⁴ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid, 2004.

Al resolver la ecuación de segundo grado, se obtiene $h= 1.46m$, por lo cual se adopta una profundidad de hinca de $2m$.

Determinación de los coeficientes de seguridad en cada nivel:

- a) Cálculo del empuje horizontal activo sobre la pantalla ficticia

Para $Z= 6.15 m$.

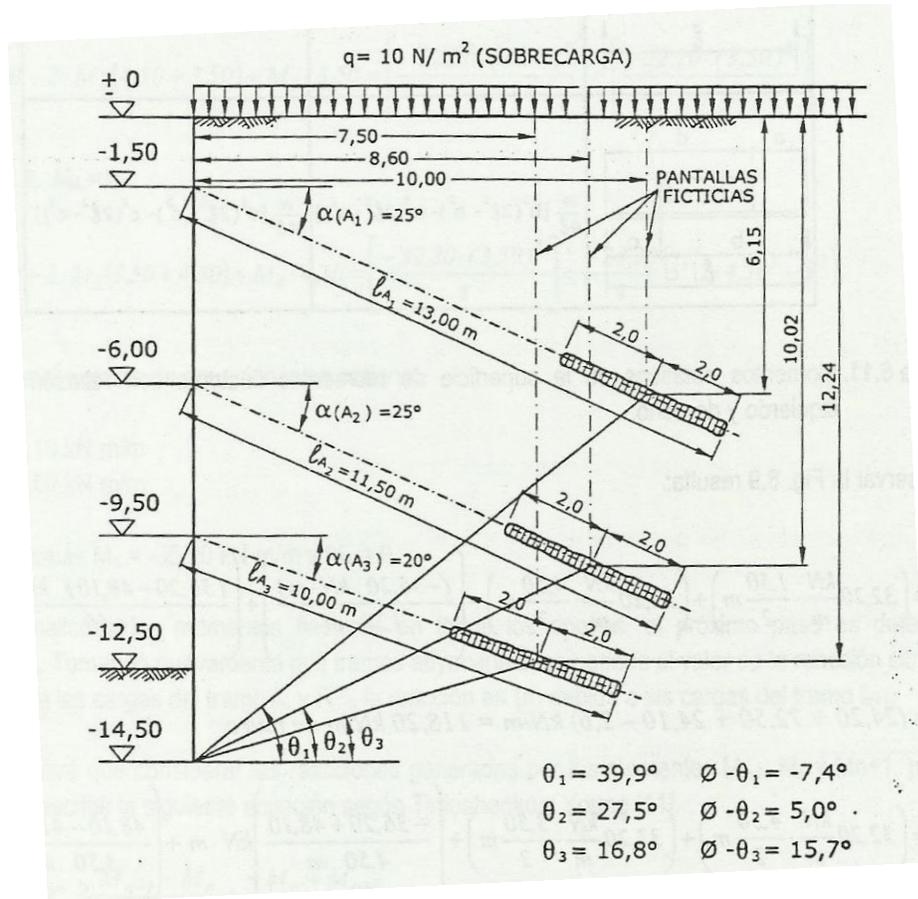


Figura 3. 14 Disposición de los anclajes en el ejemplo.³⁵

$$E_{(A)} = k_a * q * z * \frac{1}{2} k_a * \gamma * z^2$$

$$E_{(1h)}(A1) = \frac{1}{4} * 10 \frac{KN}{m^2} * 6.15m + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} * 19 \frac{KN}{m^3} * 6.15^2 m^2$$

$$E_{(1h)}(A1) = 105 KN/m$$

³⁵ UCAR, Roberto. *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid, 2004.

1) Primer Nivel de anclajes

Profundidad del muro ficticio $Z = 6.15\text{m}$

Ángulo del plano de falla profundo $\theta = \theta_1 = 39.90^\circ$

$$G(A) = \frac{1}{2} * (6.12 + 14.50)\text{m} * (14.50 - 6.15)\text{m} * \cot 39.90^\circ * 19 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} + 10 \frac{\text{KN}}{\text{m}} * (14.50 - 6.15)\text{m} \cot 39.90^\circ$$

$$G(A) = 2.060 \text{ KN/m}$$

2) Segundo Nivel de anclajes

Profundidad del muro ficticio $Z = 10.02 \text{ m}$

Ángulo del plano de falla profundo $\theta = \theta_2 = 27.50^\circ$

$$G(A2) = \frac{1}{2} * (10.02 + 14.50)\text{m} * (14.50 - 10.02)\text{m} * \cot 27.50^\circ * 19 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$$

$$G(A2) = 2.00 \text{ KN/m}$$

3) Tercer Nivel de anclajes

Profundidad del muro ficticio $Z = 12.24 \text{ m}$

Ángulo del plano de falla profundo $\theta = \theta_3 = 16.80^\circ$

$$G(A3) = \frac{1}{2} * (12.24 + 14.50)\text{m} * (14.50 - 12.24)\text{m} * \cot 16.80^\circ * 19 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$$

$$G(A3) = 1.90 \text{ KN/m}$$

c) Determinación del E_{rh}

$$E_{rh} = k_a * q * (H + h_t) + \frac{1}{2} \gamma * k(H + h_t)^2$$

$$E_{ah} = \frac{1}{4} * 10 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 14.50 + \frac{1}{2} 19 \text{KN/m}^3 * \frac{1}{4} (14.50)^2 \text{m}^2$$

$$E_{ah} = 536 \text{ KN/m}$$

A través de la ecuación de E_{rh} , el resultado es el siguiente:

Primer nivel

$$E_{rh}(A_1) = (G - (E_{ah} - E_{1h}) \tan(\delta)) \tan(\delta - \theta)$$

$$G(A_1) = 2.060 \text{ KN/m}$$

$$E_{ah} = 536 \text{ KN/m}$$

$$E_{1h}(A_1) = 105 \text{ KN/m (empuje sobre la pantalla ficticia)}$$

$$\tan \delta = \tan 21.7^\circ = 0.40$$

$$\theta = \theta_1 = 39.90^\circ, \phi = 32.5^\circ$$

$$\tan(\delta - \theta) = -0.33$$

$$E_{rh}(A_1) = (2.060 - (536 - 105) * (-0.13)) = -245 \text{ KN/m}$$

Teniendo en cuenta una inclinación en el anclaje de $\alpha = 25^\circ$, al utilizar la ecuación de f_A resulta:

$$f_A = \frac{1}{1 + \tan \alpha * \tan(\theta - \phi)} = \frac{1}{1 + \tan 25^\circ * \tan(32.5^\circ - 39.9^\circ)} = 1.06$$

Al considerar la fórmula de A_h^+ , el valor máximo posible de anclaje A_h^+ es:

$$A_{1h}^+ = f_A * (E_{ah} - E_{1h} - E_{rh})$$

$$A_{1h}^+ = 1.06 * (536 - 105 - 245) \text{ KN/m} = 200 \text{ KN/m}$$

Siendo el coeficiente de seguridad en el primer nivel

$$n_1 = \frac{A_{1h}^+}{A_{1h}} = \frac{200 \text{ KN/m}}{118.20 \text{ KN/m}} = 1.69$$

Siguiendo el mismo procedimiento anterior, se obtiene:

$$A_{2h}^+ = 420 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \text{ (segundo nivel)}$$

$$n_2 = \frac{A_{2h}^+}{A_{1h} + A_{2h}} = \frac{420 \text{ KN/m}}{(118.20 + 133.30) \text{ KN/m}} = 1.67$$

$$A_{3h}^+ = 609 \frac{KN}{m} \text{ (tercer nivel)}$$

$$n_3 = \frac{A_{3h}^+}{A_{1h} + A_{2h} + A_{3h}} = \frac{609 \text{ KN/m}}{(118.20 + 133.30 + 126.90) \text{ KN/m}} = 1.61$$

De acuerdo a la norma para la inclinación de anclajes, se debe obtener un coeficiente de seguridad en el cual se cumpla $n_i \geq 1.50$

Finalmente, el buzamiento del plano profundo de deslizamiento θ se calcula para cada nivel de anclaje de acuerdo a la figura de ejemplo como a continuación:

$$\overline{BC} = \overline{OB} \frac{\cos(45^\circ + \phi/2)}{\text{sen}(45^\circ + \frac{\theta}{2} - \alpha)}$$

α = Inclinación del anclaje (negativo cuando va por debajo de la horizontal)

ϕ = Ángulo de fricción interna.

\overline{OB} = Cota del anclaje medido a partir del nivel hincado.

\overline{CD} = Longitud mínima que garantice que la zona de anclaje se encuentra localizada en la masa de suelo estable; es decir, detrás de la superficie de deslizamiento generada por la presión activa del terreno. Esta será 15% a 20% de la altura total de la excavación.

\overline{DE} = Distancia correspondiente a la mitad de la longitud de la zona de anclaje; es decir, la parte solidaria a la masa de suelo encargada de transferir los esfuerzos al terreno. Asimismo, corresponde a la longitud del miembro inyectado del anclaje.

$\alpha = -25^\circ$ (negativo por debajo de la longitud horizontal)

$\phi = 32.5^\circ$

$\overline{OB} = 13m$

$$\overline{BC} = 13 * \frac{\cos 61.25^\circ}{\text{sen}(61.25^\circ + 25^\circ)} = 6.26m$$

Para determinar \overline{CD} , se tomará un 19% de la profundidad total de la excavación.

$$\overline{CD} = 0.19 * 14.50m = 2.75m$$

$$\overline{DE} = \frac{1}{2} \overline{DF} = 2m$$

Para efectos de diseño, según Ranke y Ostermayer, $\overline{DF} = 4m$ al considerar una resistencia lateral limite en el contacto suelo- lechada de cemento de $\tau = 120KN/m^2$.

En estas condiciones, para el primer nivel de anclajes la longitud \overline{DF} , se obtiene mediante fórmula:

$$\overline{DF} = \frac{(A_1 * S) * n}{\pi * \phi * \tau}$$

La fuerza de anclaje A_1 por unidad de longitud teniendo en cuenta la inclinación α y su componente horizontal A_{1h} es:

$$A_1 * \cos \alpha = A_{1h}, \text{ entonces } A_{1h} = 118.20 \text{ KN/m}$$

$$A_{1h} = \frac{A_1}{\cos \alpha} = \frac{118.20 \text{ KN/m}}{\cos 25^\circ} = 130.40 \text{ KN/m}$$

S= Separación entre anclajes consecutivos = 2m

n = Coeficiente de seguridad = 1.50

ϕ = Diámetro de inyección = 285 mm = 0.285m

$$\overline{DF} = \frac{\left(13.04 \frac{t}{m} * 2m\right) * 1.50}{\pi * 0.285m * 12 t/m^2} = 4m$$

Por lo tanto:

$$\overline{BE} = \overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DE} = 6.26m + 2.75m + 2m = 11m$$

Según la Figura 25 se observa

$$\overline{BE} * \cos \alpha = \overline{BG}$$

$$11 * \cos 25^\circ = \overline{BG}, \text{ entonces } \overline{BG} = 10m$$

$$\tan \theta = \theta_1 = \frac{(14.05 - 1.50 - \overline{BE} * \sin \alpha)}{\overline{BG}}$$

$$\tan \theta_1 = \frac{(14.05 - 1.50 - 11 * \sin 25^\circ)}{10}$$

$$\theta = \theta_1 = 39.9^\circ$$

4. CAPÍTULO 4: PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y MAQUINARIA

4.1. Anclajes temporales Post tensados

En la figura 4.1 se observa el proceso constructivo de muros anclados definido por etapas.

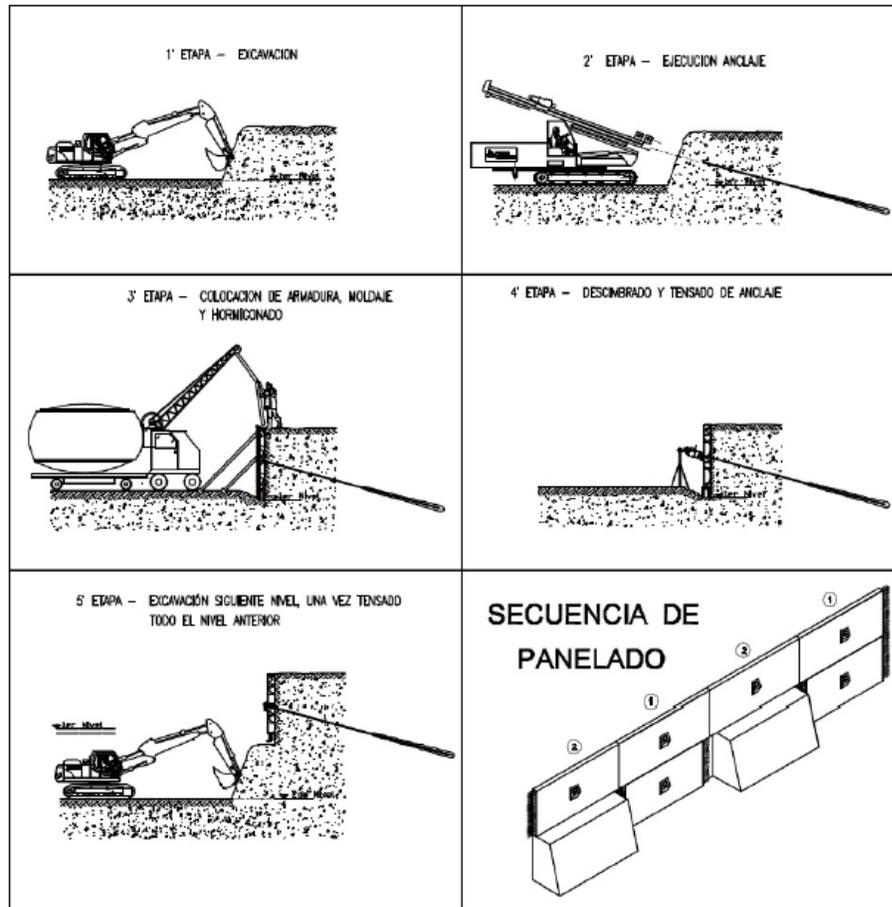


Figura 4. 1 Proceso constructivo de anclajes pos tensados.³⁷

4.1.1 Proceso constructivo

El proceso constructivo de muros anclados pos tensados se describe a continuación:

- 1) Excavación Masiva: Esta se hace por etapas y se va avanzando por anillos. Para ello, la máquina excavadora o la retroexcavadora que se está empleando normalmente se deberá quedar en la obra para contribuir con el avance.

³⁷ CABELLOS, G.A. *Análisis comparativo de la estabilización de taludes mediante el uso de muros anclados y calzaduras en la construcción de edificaciones. Tesis para optar el título de Licenciado en Ingeniería Civil.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012.

- 2) Perforación e introducción de cables de inyección: Una vez que el área del terreno está limpia, luego de la excavación masiva, pasa la cuadrilla de topografía. Esta definirá el punto de anclaje de acuerdo a cómo se encuentra detallado en planos.
- 3) Paralelamente la cuadrilla de perforación procederá a realizar el armado del taladro y “casing” (revestimiento) con la punta del taladro en la máquina perforadora. Luego, en la máquina perforadora y en el casing, se procede con la colocación de lubricantes necesarios al taladro para facilitar la rotación del mismo. De igual manera, se colocará la espuma líquida en el agua, la cual servirá como limpiador tanto del suelo como del taladro.
- 4) Seguidamente, la cuadrilla de perforación colocará la punta del taladro en el punto marcado por la cuadrilla de topografía. Se procederá a tomar las mediciones del ángulo de perforación hasta el ángulo que se indique en los planos previamente calculados por el Ingeniero Responsable en el diseño del anclaje.
- 5) Se da la perforación, proceso en el cual se va penetrando en el terreno añadiendo las extensiones de casing, taladros, espuma, entre otros, necesarias hasta la profundidad requerida indicada en planos.
- 6) Se procede a retirar el taladro para dejar el casing libre. Esto con el fin de dar paso a la colocación de los cables de acero para el anclaje, el cual ha sido preparado con anterioridad de acuerdo a las especificaciones de diseño para cada muro anclado.
- 7) El siguiente paso es retirar el casing después de que los cables ya están correctamente colocados para dejar el orificio libre y preparado para la inyección de concreto (la cual es generalmente una bolsa de cemento por cada 25 litros de agua). Esto terminará cuando se haya rellenado el bulbo y empiece a salir mezcla del orificio. Es importante resaltar que todo el proceso de inyección solo se procederá cuando se tenga de 3 a 5 anclajes colocados.
- 8) Como pasos adicionales, se inicia la excavación de banquetas y el perfilado manual con picos y palas y colocando tablestacas. Esto tomando en cuenta la seguridad por el potencial desmoronamiento que tienden a sufrir las arenas y minimizar, de esta manera, los riesgos.
- 9) Finalmente se incluirá un refuerzo adicional en la zona de anclaje y seguidamente se procederá a realizar el armado de acero del muro pantalla siguiendo al cuidado las indicaciones que mande el plano estructural.
- 10) Seguidamente, se procede a encofrar con las debidas indicaciones, controles, seguridad y cuidados del caso. Posteriormente, se los deja debidamente apuntalados para la futura colocación de concreto.

- 11) El siguiente paso es el vaciado de concreto en los muros, especialmente con un concreto premezclado con resistencia temprana y utilizando una bomba para concreto para facilitar el trabajo, y reducir inseguridades y riesgos.
- 12) Al día siguiente del vaciado, se procede a desencofrar retirando las planchas del muro con desmoldantes y dejándolos limpios.
- 13) Por último, se pasa al tensado de cables después de que el concreto ha alcanzado una resistencia específica, que normalmente, y para ganar tiempo, se estila a hacer de 3 a 7 días, con una fuerza variable de 25 a 35 toneladas. Esto depende de la especificación de cada muro indicada por los planos estructurales. Cabe mencionar que es un procedimiento rápido de aproximadamente 30 minutos por punto.
- 14) Es de suma importancia mencionar que una vez colocados los sistemas de sostenimientos futuros y permanentes (las losas), ya no será necesaria la tensión en los muros anclados en el terreno y, por ende, se procederá a cortar los cabezales de los anclajes.

4.1.2 Equipos y maquinaria

En la figura 4.2 se observa la máquina perforadora Stenuik, que se utiliza para los anclajes de muros pos tensados.

- **Máquina perforadora**



Figura 4. 2 Máquina Perforadora, inyectora Stenuik P600.³⁸

³⁸ Fuente Propia

DATOS TECNICOS

- Motor Turbo CV 100 tipo VM Sun 4105.
- Cabezal Rotatorio Tipo M. 57 H con 600 Kg/m.
- Motor con fuerza elevadora, Tipo F .608 H de 5,000 Kg.
- Potencia de Tracción: 6,400 Kg.
- Accesorios completos con tuberías de perforación trilama tipo step.

CARACTERISTICAS

- Perforadora multifuncional con torre giratoria en todos los ángulos.
- Para la minería con más de 500 m. de profundidad.
- Búsqueda de pozos de agua.
- Geotecnia y estudios de Suelos.
- Anclajes y reforzamiento para la Ingeniería civil.
- Perforaciones con Sistemas Symetrix DHT (Con revestimiento)

En la figura 4.3 se observa la máquina compresora de aire de 10 a 20 Bares.



Figura 4. 3 Máquina Compresora de aire de 18 bares.³⁹

³⁹ Fuente Propia

Cables pos tensados



Bobina de Cable.



Figura 4. 4 Cables para el Post Tensado.⁴⁰

Equipo de Inyección de concreto



Mesa de inyección



Manómetro

Latiguillo
inyección



Bomba de
inflado

Figura 4. 5 Equipo de inyección de concreto.⁴⁰

Gata para post tensado

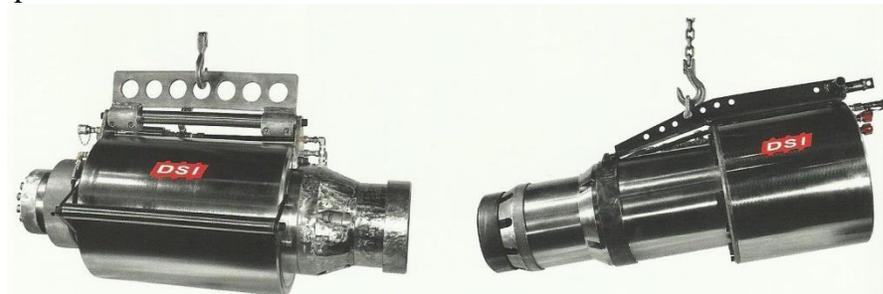


Figura 4. 6 Gata pos-tensadora de cables.⁴⁰

⁴⁰ Dywidag-Systems International (DSI) (s/f). *Gama de productos geotécnicos* [Catálogo].

4.2 Suelo enclavado.

En la figura 4.7 se observa el procedimiento del anclaje del suelo enclavado paso a paso.

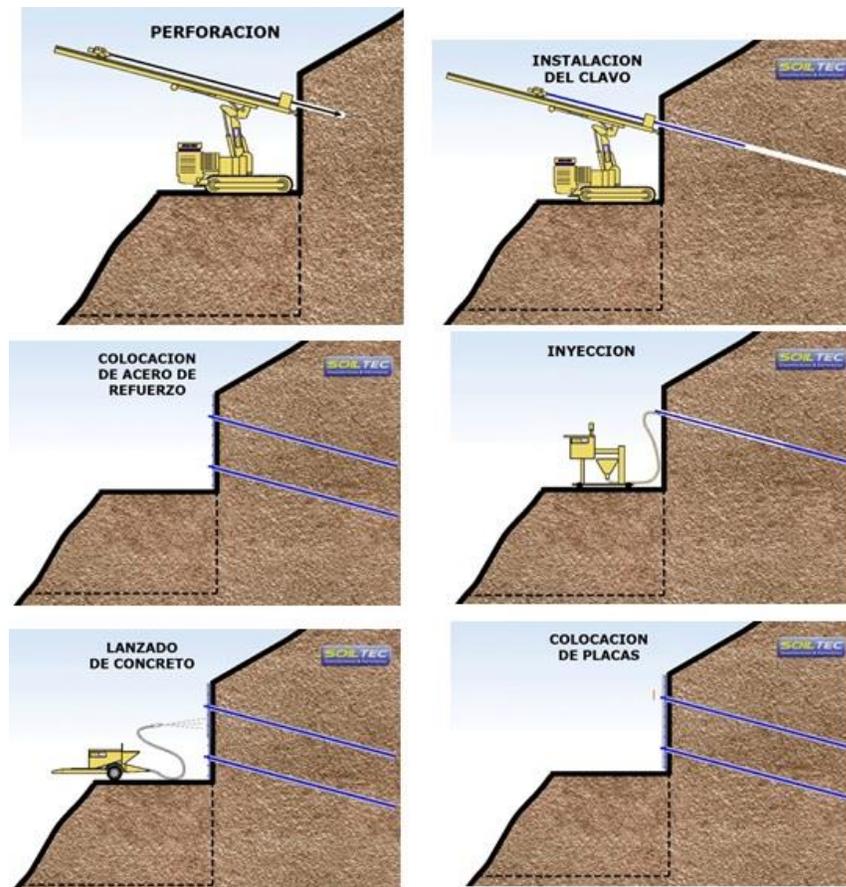


Figura 4. 7 Procedimiento suelo enclavado.⁴¹

4.2.1 Inclusiones:

Las inclusiones son elementos cortos o largos que se incrustan o colocan en el suelo formando retículas, estabilizando y reforzando el suelo. Las inclusiones en el suelo enclavado trabajan como refuerzo y la carga es transmitida a todo lo largo de la inclusión.

El Suelo enclavado “Soil Nailing” utiliza inclusiones enclavadas que son adecuadas para construcciones temporales y usan barras de acero # 5 a # 11 o angulares estructurales para mayor rigidez de clavado. Las barras de acero tienen resistencia del orden de 60 a 85 kg/mm², con límite elástico convencional de 50 a 70 kg/mm². Es importante que todos estos tipos de acero sean dúctiles, con alargamientos en rotura superiores al 4% para evitar la rotura frágil, y facilitar, en caso sea necesario, un reajuste de esfuerzos.

⁴¹ SOIL TEC CIMENTACIONES Y ESTRUCTURAS

Soil Tec: Soil Nailing. Consulta: 27 de Noviembre 2014. Recuperado de:
<http://www.soiltec.com.gt/index.php/servicios/soil-nailing>

Estos tienen una separación corta de 2 a 4 “nail” (inclusiones) por cada 10 pies² (0.9 m²), creando una masa de suelo homogéneo y reforzado.

Las inclusiones son clavadas utilizando vibro percusión neumática o martillos hidráulicos. Esta técnica de instalación es rápida y económica (3 a 5 inclusiones por hora), pero está limitada por la longitud de la inclusión instalada, por consideraciones de equipo y adicionalmente por las condiciones del suelo. Cabe mencionar que en gravas y rocas intemperizadas no es posible su uso.

El muro se construye con una secuencia constructiva de arriba hacia abajo, de manera que en paralelo a la excavación del material (suelo), se vaya construyendo el muro. Esto con el fin de reducir la descompresión del terreno lo máximo posible y los posibles daños durante el proceso de movimiento de tierras.

- 1.) Es un proceso más corto y, por ende, más rápido, donde el primer paso, como en todos los casos, es que se procede a la excavación del terreno.
- 2.) Una vez perfilado el talud en corte que se requiera, se procede a marcar los puntos que el diseño en plano especifica. De esto se encargará el equipo de topografía.
- 3.) Se procederá a la perforación del punto hasta donde la longitud ha sido calculada. Para ello, tanto el equipo de perforistas como el ingeniero responsable deben ir controlando la profundidad de perforación y teniendo mucho cuidado para evitar futuros problemas o equivocaciones.
- 4.) Las barras del refuerzo son instaladas en ubicaciones predeterminadas con la longitud e inclinación especificadas. Esto se hace utilizando los métodos de perforación y colocación de lechada apropiados para el suelo en el cual serán construidos.
- 5.) Las inclusiones son pre-esforzadas a un pequeño porcentaje de sus cargas de trabajo, contra unas platinas aseguradas en la capa inicial de concreto lanzado. La carga de pre-esfuerzo usualmente no excede el 20 % de la carga de trabajo.
- 6.) Se procede a las pruebas seleccionadas del clavo de refuerzo.
- 7.) Se coloca la malla de refuerzo en la parte exterior del terreno.
- 8.) Se aplica “Shotcrete” o lanzado de concreto en el área del refuerzo exterior.
- 9.) Finalmente, se instala las placas o cuñas, arandelas y tuerca. Se continúa con el siguiente nivel siguiendo el mismo procedimiento.

4.2.2 Equipos y maquinaria

A continuación se detalla los equipos y maquinarias que se utilizan en los suelos enclavados:

- **Malla de alambre soldado**

La malla de alambre soldado puede utilizarse para aplicaciones temporales y permanentes. Es utilizada en estratos de roca intemperizada o en suelos granulares fuertemente cementados, donde la erosión de la superficie no se considera significativa. Para aplicaciones permanentes, el galvanizar la malla es necesario generalmente.

- **Concreto lanzado**

El lanzado de concreto es ampliamente utilizado tanto para estructuras temporales como permanentes. El lanzado provee una capa superficial continua y flexible que puede rellenar vacíos y grietas de la superficie excavada. Para aplicaciones permanentes, siempre se refuerza con malla de alambre soldado con el espesor necesario con capas sucesivas de lanzado, cada una de 2 a 4 pulg. (5 a 10 cm) de espesor.

Aplicaciones temporales han sido construidas utilizando malla de alambre soldado o fibras de refuerzo y concreto lanzado. El colocar la malla de alambre soldado o las fibras de refuerzo tiene el fin de dar mayor flexibilidad a la estructura y reducir la propagación de rajaduras. La durabilidad del lanzado depende en gran medida de mantener la relación agua cemento alrededor de 0.4 y utilizar una entrada de aire adecuada.

- **Paneles prefabricados**

Los paneles prefabricados son utilizados en aplicaciones permanentes para proveer un acabado al producto que satisfaga los diversos requisitos estéticos, ambientales y de durabilidad. Estos, también, proveen un drenaje continuo atrás del revestimiento. Los paneles prefabricados pueden ser adjuntados a las inclusiones o ensamblados a la cabeza de la inclusión por medio de diferentes dispositivos.

- **Cabeza del “Nailing” o Inclusión**

La cabeza del Suelo enclavado la integran tres componentes principales: la platina, la tuerca y la roldana. La platina es fabricada de acero grado 36 (ASTM A 36) y es generalmente cuadrada de 200 a 250 mm de largo por 19 mm de grosor. La función de la platina es la de distribuir la fuerza al final de la inclusión durante el procedimiento del concreto lanzado y contrarrestar las fuerzas del talud. Además, la platina contiene un agujero central en donde se coloca la barra de acero. La roldana es luego insertada en la barra de acero la cual es asegurada por medio de una tuerca hexagonal. La roldana y la tuerca son fabricadas con acero consistente con la de la barra de acero de grado 60.

Las tuercas son ajustadas por medio de una llave de calibración.

- **Inyección**

La inyección para Suelo enclavado es comúnmente una mezcla de cemento con agua, la cual llena el espacio anular entre la barra de la inclusión y el suelo que lo rodea. Los tipos de cementos que se puede utilizar son el tipo I, II, III o V de acuerdo a la norma ASTM C 150, la cual hace referencia a la especificación normalizada para cemento Portland.

La relación entre agua/cemento para la inyección en el Suelo enclavado varía entre 0.4 y 0.5. En algunos casos, se puede utilizar una mezcla más densa con un “slump” o devenimiento de 30 mm debido a que la inclusión se encuentra en un suelo altamente permeable o roca altamente fracturada. Ocasionalmente una mezcla muy densa puede ocasionar dificultades con la instalación de los centralizadores. En estos casos, la mezcla por si sola puede proveer suficiente soporte para centralizar la barra de acero.

Las características de la mezcla para la inyección suele ser de alta influencia para un buen Suelo enclavado. Se debe de utilizar una mezcla que logre alcanzar como mínimo a los 28 días una resistencia a la compresión de 3,000 psi. La mezcla es bombeada poco después de ser colocada la barra de acero para reducir el riesgo de derrumbes internos en el agujero.

- **Centralizadores**

Los centralizadores son accesorios hechos de PVC o cualquier otro material sintéticos que son instalados en varias localizaciones a lo largo de la longitud de la barra de la inclusión. Esto es para asegurar que un mínimo grosor de mezcla cubra completamente la barra de acero. Estos son instalados en intervalos regulares generalmente, no excediendo los 2.50 metros a lo largo de la longitud de la inclusión y a una distancia de aproximadamente 0.5 metros de cada extremo.

- **Elementos de Protección a la corrosión**

Son utilizados como elementos de protección a la corrosión pinturas epóxicas en las inclusiones que se encuentran en suelos altamente salinos y que serán permanentes. El recubrimiento epóxico es un material di-eléctrico que impide el paso de la corriente eléctrica que favorece a la corrosión.

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se observa la maquinaria y equipo utilizado en el suelo enclavado.



Figura 4. 8 Maquinaria para perforación de inclusión “nail”.⁴²



Figura 4. 9 Gata hidráulica efectuando prueba de carga en “nail”.⁴³

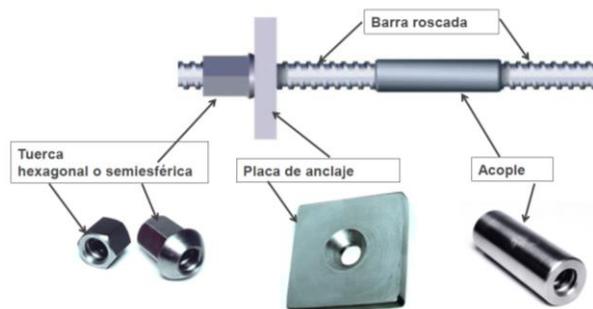


Figura 4. 10 Elementos Fundamentales del “Nail”.⁴³

⁴² Estratos Fundaciones. Tecnología y Maquinaria. Perforadora C-6. Recuperado de: <http://www.estratos-fundaciones.cl/perforadora-c6.html>

⁴³ Dywidag-Systems International (DSI) (s/f). *Gama de productos geotécnicos* [Catálogo]

4.3 Anclajes Tirabuzón (Auto Perforantes)

Este es un tipo de anclaje relativamente extendido que, como se mencionó anteriormente, trata de armaduras formadas por tuberías de acero, que se utilizan directamente como varillaje de perforación para lo cual se coloca una boca de perforación al extremo.

Al final de la perforación, el tirante ya está colocado y se puede proceder a inyectarlo por el interior de la tubería, retornando la inyección por el exterior. También, puede utilizarse lechada de cemento como fluido de perforación, con lo cual se garantiza un mejor resultado, pudiendo incluso tener longitud libre.

El sistema de barra auto perforante combina la capacidad de carga geotécnica con la ejecución de la perforación por la propia barra. Gracias a la barra hueca auto perforante con barrido de lechada de cemento simultaneo, el proceso de instalación se puede simplificar y acortar los plazos considerablemente. Además, tiene la ventaja de no necesitar de entubados para su instalación en cualquier tipo de terreno.

Asimismo, se sabe que es un sistema hasta 3 veces más rápido que cualquier otro debido a que perfora, coloca la armadura e inyecta en una simple operación. Así, es un sistema estandarizado.

La barra auto perforante sirve como barra de perforación. Lleva una boca perdida de perforación en su punta que se adapta a las diferentes condiciones del suelo. Las barras tienen una longitud entre 1 y 6 metros y cada una se acopla al interior ya instalada mediante un manguito de unión.

En la fase final de los trabajos de perforación, se inyecta lechada de cemento por el interior de la barra hueca a través de un adaptador de inyección fijada en el equipo de perforación.

La lechada sale al exterior por unos orificios situados en la boca de perforación, sirviendo al tiempo como fluido de barrido y como elemento estabilizador de la perforación.

Después de haber llegado a la profundidad de perforación requerida, la lechada de barrido se cambia por otra inyección con mayor resistencia. En ese momento, la barra hueca se convierte en un tirante de acero y se puede usar como bulón, perno de roca o como micro pilote.

Las barras auto perforantes ofrecen tirantes con un límite de rotura desde 210 KN hasta 1900 KN.

4.3.1 Principales características

Entre sus principales características tenemos las siguientes:

- El tirante sirve simultáneamente como barra auto perforante.
- Instalación extremadamente rápida: No se requiere perforación previa debido a que la perforación e inyección se realizan al mismo tiempo.
- Equipos compactos: No se necesita mucho espacio durante la instalación
- Bocas disponibles para todo tipo de terreno.
- Uso como bulón.

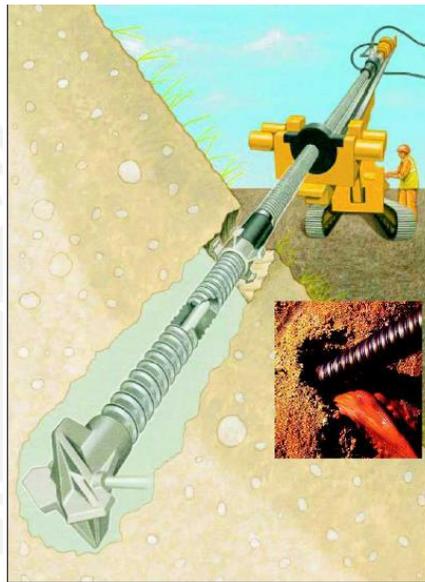


Figura 4. 11 Sistema de anclaje auto perforante.⁴⁴

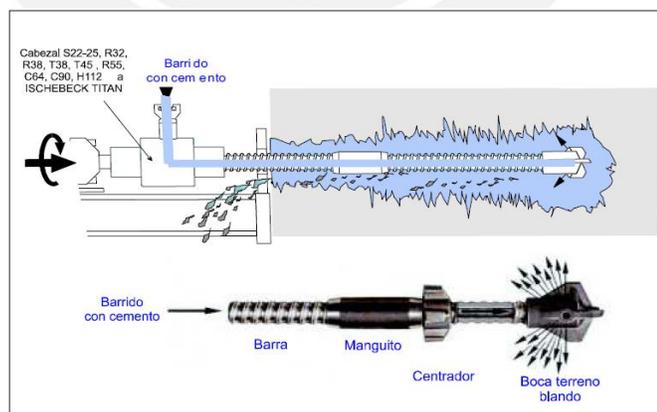


Figura 4. 12 Sistema 3 en 1 Perfora, coloca la armadura e inyecta concreto.⁴⁴

⁴⁴ TITAN (s.f.)

Micropilotes, anclajes y bulones autopercorantes. Recuperado de http://www.ischebeck.es/assets/files/geotecnia/prospekt.geotechnik_universal_es.pdf



Figura 4. 13 Elementos que conforman el sistema auto perforante.⁴⁵

Gracias a la perforación e inyección simultánea, la barra auto perforante permite la instalación especialmente rápida. Para potenciar estas ventajas y garantizar una perforación eficaz, es esencial escoger los accesorios correctos.

4.3.2 Técnica de perforación

Las tres funciones principales de la perforación son las siguientes:

- 1.) Rotación: De 120 a 150 RPM. Este es el parámetro decisivo para garantizar que toda la perforación se realice en el diámetro deseado.
- 2.) Frecuencia percutora: De 300 a 600 RPM. Esto es para la obtención de estabilidad direccional y eficiencia en la perforación.
- 3.) Avance: El avance debería ser regulado y adaptado al rendimiento de instalación alcanzable.

Los principales elementos para el anclaje auto perforante son los siguientes:

- **Martillo de Roto-percusión**

El martillo de roto-percusión es el elemento principal del equipo para instalar barras auto perforantes. La utilización de este asegura una perforación eficaz en la mayoría de los terrenos, así como permite una buena estabilidad direccional de la barra perforada y ayuda a consolidar la lechada de cemento inyectada. Cabe señalar que la tracción rotatoria necesita tener un momento y una velocidad de giro suficiente.

⁴⁵ Dywidag-Systems International (DSI) (s/f). *Gama de productos geotécnicos* [Catálogo]

- **Perforar e Inyectar en un solo paso**

Esta técnica permite la distribución homogénea de la lechada de cemento a lo largo de toda la perforación. La lechada de cemento penetra en la roca circundante y va creando bulbos en las partes más blandas de la perforación.

La acción repetida de la barra auto perforante en la parte más profunda del taladro proporciona una adherencia aún mejor, porque la densidad del suelo es normalmente más alta en este lugar a causa de la presión.

Los bulones de barra auto perforante son idóneos para terrenos sueltos o inestables, porque se pueden instalar sin entubar el taladro. Así, se suele emplear el sistema en rellenos heterogéneos, materiales granulares y suelos descomprimidos.

Los bulones son comúnmente definidos como anclajes pasivos de poca carga (30 a 150 KN). La longitud completa inyectada permite anclar las capas sueltas del terreno superficial a una capa estable más profunda. Generalmente los bulones se definen como instalaciones de poco riesgo. Entonces, los bulones deberían ser instalados en forma de rombo para asegurar una distribución eficaz de la armadura. Se debe procurar un sistema de drenaje adecuado en el talud anclado para asegurar que no se acumule agua en el interior del talud, lo que redundaría en una carga incontrolada.

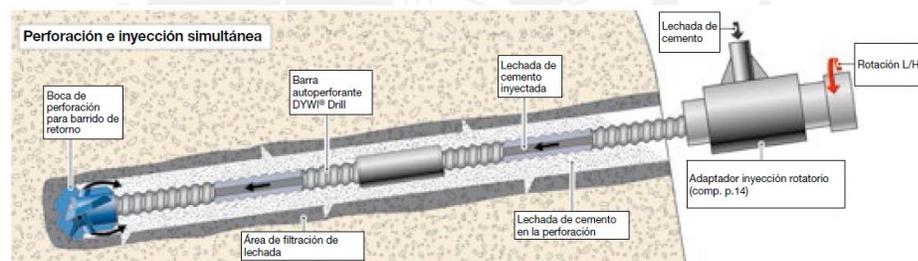


Figura 4. 14 Perforación e inyección simultánea .⁴⁶

⁴⁶ Dywidag-Systems International (DSI) (s/f). *Gama de productos geotécnicos* [Catálogo]

5. CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y COMPARACIONES

5.1 Anclajes temporales Post Tensados

5.1.1 Costos

“En todos los sistemas de sostenimiento se deberá contar con un protocolo de instalación. En el caso de anclajes o nailings estos deberán ser probados individualmente hasta una carga equivalente a 1.5 veces la carga de trabajo si es permanente y 1.2 veces si es provisional”⁴⁷

Para realizar un análisis comparativo entre las técnicas antes mencionadas, se debe aislar el proceso del anclaje más la instalación del muro hasta el tensado.

Los trabajos preliminares como los estudios de mecánica de suelos, los movimientos de tierras, movilización y desmovilización de maquinaria y todos los temas relacionados al respecto serán los mismos para los tres casos, por lo cual se puede prescindir de ellos en este capítulo.

En el Perú, la técnica de anclajes de cables pos tensados es más conocida, y por ende se encuentra más desarrollada. Por lo tanto, existe bastante competencia en el mercado local, lo cual ha conllevado a mejorar cada detalle como la efectividad en tiempos y precios bajos junto a una buena seguridad y confianza.

Actualmente existen dos formas distintas de presupuestar trabajos de muros anclados. Unos presentan sus presupuestos por metrados en metros lineales de anclaje, mientras que otros lo realizan por unidad de anclajes. Ambas son totalmente válidas. Cada una plantea, también, sus tiempos estimados de entrega dependiendo mucho de la habilitación de frentes de trabajo, las condiciones locales y de distintos factores que se detallan en los respectivos contratos.

Para poder realizar los alcances y limitaciones de las propuestas económicas por anclajes de muros pos tensados, se debe basar previamente en información brindada por el cliente que contrata los servicios. De esta forma, si hubiera alguna modificación podría generar una re-cotización y posibles cambios en los precios. Para la realización de una cotización, se debe realizar, previamente, un análisis unitario de costo.

⁴⁷ Noma Técnica de Edificaciones E.050 “Suelos y cimentaciones”. Reglamento Nacional de Edificaciones. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, 2015.

Las cotizaciones incluyen lo siguiente:

1. Interpretación Geotécnica y análisis de estabilidad de la excavación, además de recomendaciones generales para su ejecución.
2. Recomendaciones de la secuencia de ejecución del vaciado de los muros de concreto.
3. Asistencia técnica durante la ejecución de los trabajos hasta el término de los anclajes.
4. Movilización y desmovilización de equipos al inicio y al final del proyecto.
5. Se considera que el equipo ingresa y sale por sus propios medios de la zona de trabajo. No se considera Izaje.
6. Perforación, instalaciones e inyecciones para la construcción de anclajes.
7. Tensado de los anclajes, con suministro de cabezales provisionales y recuperables al culminar los trabajos, pruebas de carga al 3% del número de anclajes.
8. El tiempo estimado de maduración del bulbo con cemento normal es de 120 horas. Para menores tiempos, se coordinará y solicitará asistencia con oficina técnica, así como la respectiva re-cotización.
9. Las placas de apoyo, así como los cabezales, cuñas y cable sobrante, serán retirados de obra a medida que se realiza el destensado.
10. Se considera 0.8 bolsas de cemento Portland por metro lineal de perforación.

VALOR DE OFERTA

En la tabla 5.1 se presenta una valorización de una obra de anclajes pos tensados en la ciudad de lima de un proyecto de 4 sótanos.

ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Anclajes (1° y 2° Nivel)	Und	40	S/. 3,753.75	S/. 150,150.00
2	Anclajes (3° y 4° Nivel)	Und	20	S/. 3,668.00	S/. 73,360.00
3	Hora Stand by	Hrs		S/. 350.00	
4	Movilización y desmovilización	Und	3	S/. 5,000.00	S/. 15,000.00
SUB TOTAL (SIN IGV)					S/. 238,510.00

Tabla 5. 1 Presupuesto muros anclados hasta el tensado.⁴⁸

El valor total de la oferta presentada para la ejecución total es de Doscientos treinta y ocho mil quinientos diez con 00/100 Nuevos soles (S/. 238,510.00).

⁴⁸ Fuente Propia

Tomando en cuenta lo mencionado al inicio de este capítulo, realizando los descuentos al presupuesto que no consideraremos de horas stand by (horas que no se labora) y de movilización y desmovilización tendremos un total de S/. 223,510.00.

Podemos observar también en este presupuesto que para el caso particular de este contrato, los anclajes de 1° y 2° nivel se encuentran separados de los anclajes de 3° y 4° nivel y que los primeros son más caros que los últimos además que no se menciona con cuantos metros lineales cuenta cada anclaje.

5.1.2 Plazos de entrega

Siguiendo el estudio de la oferta económica de La empresa, observamos los plazos de tiempo que presentan y encontramos que ofrecen un plazo de ejecución de Veintiún días hábiles (21) contados a partir de la ejecución del primer elemento, siendo este plazo un plazo efectivo y no necesariamente corresponde al tiempo programado de obra. Para la ejecución total de los muros anclados, el rendimiento esperado es 2 a 4 anclajes día (para esta empresa en las condiciones de suelo gravoso). El plazo de ejecución dependerá de las condiciones de frente de trabajo entregada por el cliente, y cualquier retraso generado por el cliente será motivo de una ampliación de plazo para la ejecución de los anclajes.

La forma de pago que plantea la empresa es la siguiente: solicitan un contado inicial a manera de anticipo del veinticinco por ciento (25%) y el saldo en valorizaciones Quincenales según avance de obra, pagaderos a siete días de presentada la factura. El adelanto se descontará en el mismo porcentaje del anticipo hasta su amortización.

Las empresas ahora disponen también de equipos (ya sean propios o alquilados) y de personal capacitado para desarrollar el trabajo de manera eficiente con bastante experiencia en el rubro y a convenir, según fecha de iniciación del proyecto; cabe aclarar que sujeto a disponibilidad de equipo los equipos y personales ofrecidos son:

- 01 Perforadora Hidráulica.
- 01 Central de Inyección.
- 01 Compresor de alta presión.
- 01 Capataz.
- 01 Operador de Perforadora.
- 01 Operador de Inyección.
- 02 Ayudantes de obra.

Algunas empresas a manera de evitar tener problemas a futuro y cubrirse plantean ciertas consideraciones especiales a tener en cuenta: Se deberá verificar la existencia de elementos enterrados y/o de servicios antes de contratar la obra, La empresa no se responsabiliza por interferencias preexistentes que puedan afectar el desarrollo normal de obra y que conlleven a un rediseño.

Otra manera de presentarse para competir en anclajes de muros pos tensados temporales es por metro lineal y no tienen mucho más detalles que analizar más que los precios unitarios por metro lineal. La tabla 5.2 presenta un presupuesto por metro lineal.

Descripción	Unidad	P. Unitario (S/.)
Anclajes pos tensados temporales	ml.	333.85

Tabla 5.2 Costo por metro lineal de anclaje.⁴⁹

Sin diferenciar a que nivel de sótano se refiera ni condiciones de trabajo que se puedan presentar. Con un promedio de avance de 3.5 pilotes de 9 ml cada uno por día

5.1.3 Seguridad

Y ahora en el tema de seguridad, que es un tema muy importante ya que hasta se puede salvar vidas si se toman en cuenta todos los detalles, en muros anclados pos tensados temporales podemos mencionar que siempre es posible identificar los peligros y evaluar los riesgos de cada actividad que se realizara previa a la ejecución de obras. Para ello debemos ser capaces de poder identificar de manera clara y concisa todos los peligros asociados a las actividades desarrolladas en obra. Seguidamente se debe establecer las medidas de control necesarias, que permitan eliminar, disminuir o llevar el riesgo evaluado a niveles que no causen mayores daños a la vida. Para poder continuar debemos primero definir algunos términos con respecto a la seguridad:

- Peligro: Es la fuente con potencial para producir daños de lesión en personas, equipos, materiales y procesos en general.
- Riesgo: Combinación de la probabilidad de que ocurra un evento peligroso y la magnitud de sus consecuencias.
- Actividad: Es un conjunto de tareas que se realizan dentro de los procesos constructivos de la obra.
- Medidas preventivas y/o correctivas: Son las acciones que se adoptan con fin de eliminar los riesgos de trabajo para proteger la vida del personal a fin de controlar sus pérdidas.

⁴⁹ Fuente Propia.

En la tabla 5.3 podemos identificar que las actividades más peligrosas son excavación masiva, perforación, y perfilado por el ruido generado, la vibración, la proyección de partículas, etc. Pero todas estas actividades riesgosas pueden ser controladas con un correcto uso de Equipos de Protección Personal (EPP) que la empresa encargada de ejecutar los trabajos pueda y deba otorgarle al personal responsable en la ejecución del anclaje y que dicho personal conozca el procedimiento correcto en todo el proceso.

Peligros/actividades	Peligros/actividades																				
	Atrapamientos	Atropellos	Caidas de estructuras existentes	Caida de Objetos	Caidas de altura	Contacto con energía eléctrica	Contacto con sustancias nocivas	Cortes	Choques	Derrumbes	Explosión	Golpes	Incendio	Ingestión de sustancias nocivas	Proyección de partículas	Resbalones	Ruido	Sobreesfuerzos	Tropezones	Vibraciones	
Excavación masiva	x	x							x	x							x				
Perforación	x	x					x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	
Inyección						x					x					x					
Perfilado	x		x							x											
Colocación de acero				x	x			x				x						x			
Encofrado				x			x	x					x		x	x		x			
Vaciado de Muro				x	x	x						x						x		x	
Desencofrado				x					x						x				x		
Tensado						x												x			

Tabla 5. 3 Relación de Peligros en las actividades de anclajes.⁵⁰

5.2 Suelos enclavados

5.2.1 Costos

En cuanto a la técnica del suelo enclavado se pueden apreciar notables ventajas y desventajas que comparativamente pueden resultar favorables o desfavorables según el área de trabajo.

Se debe mencionar primero que no es una técnica muy usada en el Perú y que tiene poco tiempo de conocerse. Es bueno mencionar que en Chile y en Guatemala (solo por mencionar unos países de Latinoamérica que se pueden hacer una analogía con el Perú) se usan bastante desde hace ya varios años.

Una de las ventajas que presenta el suelo enclavado es bajo costo de ejecución y la relativa rapidez de instalación de las inclusiones no esforzadas (“Nails”) la cual es considerablemente más corta que la de los anclajes tradicionales y la capa de lanzado de concreto es relativamente más delgada.

⁵⁰ CABELLOS, G.A. (2012). Análisis comparativo de la estabilización de taludes mediante el uso de muros anclados y calzaduras en la construcción de edificaciones. *Tesis para optar el título de Licenciado en Ingeniería Civil*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Únicamente se necesita de equipo liviano de construcción para colocar las inclusiones así como equipo simple de lanzado e inyección de lechada. El llenado de las perforaciones con lechada generalmente se hace por gravedad. Esta característica puede ser de particular importancia en lugares de difícil acceso.

Debido al gran número de inclusiones, la falla de alguno de ellos no es determinante ni afecta la estabilidad del sistema como en el caso de anclajes tradicionales.

Las estructuras con suelos enclavados son más flexibles que las estructuras rígidas convencionales consecuentemente estas estructuras pueden conformar un terreno perimetral con capacidad de soportar mayores movimientos diferenciales del terreno en todas direcciones.

Los volúmenes de corte, relleno y acarreo producto de la construcción de muros convencionales se eliminan.

Presenta menor corrosión y mayor resistencia a la cortante por la mayor rigidez que brinda la barra.

En cuanto a las desventajas más claras que presenta este sistema es bueno mencionar que en áreas urbanas, el espacio corto de las inclusiones puede interferir con construcciones cercanas. Además los desplazamientos horizontales pueden ser mayores que los anclajes activos la cual puede causar distorsiones inmediatas a construcciones adyacentes.

La capacidad de la inclusión puede no desarrollarse económicamente en suelos cohesivos sujetos a desplazamientos lentos, incluso con niveles de cargas relativamente bajas.

ITEM	DESCRIPCION	UNIDA D	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Anclajes "Soil Nailing"	MI	9	S/. 250.00	S/. 2,250.00
SUB TOTAL (SIN IGV)					S/. 2,250.00

Tabla 5.4 Presupuesto "Soil Nailing"⁵¹

Un presupuesto por 1 punto estimado en 9 metros lineales de profundidad en el Perú está constando aproximadamente alrededor de S/. 250.00 por metro lineal lo que conlleva a decir que por punto de anclaje estará costando S/. 2,250.00 sin incluir impuestos (IGV).

⁵¹ Fuente propia.

5.2.2 Plazos de entrega

Con un plazo de entrega más rápido por los mejores rendimientos que presenta un avance esperado de 6 a 8 puntos de anclaje por día si no se presentan inconvenientes y el cliente le deja un frente “limpio” para avanzar

5.2.3 Seguridad

Y en cuanto a la seguridad que presenta, se toma desde el diseño un factor de seguridad mayor de 1.5 para poder avanzar con mayor seguridad ya que además en el ahorro diferencial con la técnica de anclaje post tensado temporal los costos disminuyen generando un buffer que podremos utilizar en este factor de seguridad, sobre todo por el concreto lanzado. En la tabla 5.5 se observa los riesgos y peligros en cada actividad del suelo enclavado.

Peligros/actividades	Peligros/actividades																		
	Atrapamientos	Atropellos	Caida de Objetos	Caidas de altura	Contacto con energía eléctrica	Contacto con sustancias nocivas	Cortes	Choques	Derrumbes	Explosión	Golpes	Incendio	Ingestion de sustancias nocivas	Proyeccion de particulas	Resbalones	Ruido	Sobreesfuerzos	Tropezones	Vibraciones
Excavación masiva	x	x					x	x								x			
Perforación	x	x				x	x	x	x			x	x	x		x		x	x
Inyección					x				x						x				
Perfilado	x							x											
Colocación malla de acero			x	x			x				x						x		
Lanzado concreto			x	x	x	x					x		x	x		x	x		x
Tensado					x										x		x	x	

Tabla 5. 5 Seguridad en obra “Soil Nailing”.⁵²

⁵² Fuente propia

5.3 Auto Perforantes

5.3.1 Costos

Si bien es un sistema muchísimo más rápido ya que puede realizar tres pasos en una sola actividad que son la perforación, la colocación de armadura y la inyección al mismo tiempo, resulta que es una técnica con costos demasiados elevados (el triple de los anclajes post tensados temporales tradicionales)

Como ya lo mencionamos anteriormente, las barras presentan mayor rigidez axial dado que el límite elástico de las barras es 2 a 3 veces superior al de los cables (según el tipo de barra utilizada), la sección de acero necesaria para una misma capacidad de carga es entre 2 y 3 veces superior en las barras que en los cables.

Las barras poseen una cierta rigidez transversal, lo que les permite soportar esfuerzos de cortante y flexión, mientras que los cables son muy flexibles y se deforman transversalmente sin recibir carga.

La carga alcanzable con anclajes tradicionales de cables post tensado es sustancialmente superior a la de los bulones

La ejecución de los anclajes de barra auto perforante es mucho más sencilla ya que los diámetros de perforación son menores y el montaje del anclaje más simple.

Para anclajes pasivos se emplean barras, ya que por su mayor rigidez axial requieren menor deformación para entrar en carga. Además en muchas de las aplicaciones de anclajes pasivos se suele requerir la posibilidad de resistir esfuerzos cortantes y momentos flectores

Así por el contrario en aplicaciones en las que el terreno pueda sufrir movimientos importantes no se deberían emplear los anclajes de barras auto perforantes.

Para cargas de más de 400 ó 450 KN suele ser más económico el empleo de cables que el de barras de mayor diámetro y la economía es aún mayor si la longitud necesaria de anclaje supera los 10 ó 12 metros, ya que el coste de la cabeza, que repercute en el coste por metro de anclaje es mayor en los anclajes de cables.

Si la capacidad de carga lo permite, las barras pueden ser más económicas para longitudes de anclaje hasta 10 ó 12 metros.

En la tabla 5.6 se presenta una cotización por metro lineal de un anclaje auto perforante.

ITEM	DESCRIPCION	UND	CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Anclajes de barra Auto Perforante	MI	9	S/. 850.00	S/. 7,650.00
SUB TOTAL (SIN IGV)					S/. 7,650.00

Tabla 5. 6 Presupuesto Barra Auto perforante.⁵³

5.3.2 Plazos de entrega

En cuanto a tiempos de entregas suele ser mucho más efectivo y eficiente y de mayor rendimiento los anclajes de barras auto perforantes ya que se tiene un estimado de avance de 10 a 12 puntos por día (asumiendo cada punto menor a 10 metros lineales) y si no se presentan ningún inconveniente externo al desarrollo del anclaje.

5.3.3 Seguridad

En principio este sistema genera muchas más vibraciones a la hora de ejecutarse por lo tanto es un proceso mucho más riesgoso y se debe ser más estricto en cuanto al control de calidad de las maquinarias y la seguridad del personal quienes deben estar en un nivel sumamente capacitados de dominar.

Peligros/actividades																					
	Atrapamientos	Atropellos	Caidas de estructuras existentes	Caida de Objetos	Caidas de altura	Contacto con energía eléctrica	Contacto con sustancias nocivas	Cortes	Choques	Derrumbes	Explosión	Golpes	Incendio	Ingestion de sustancias nocivas	Proyeccion de particulas	Resbalones	Ruido	Sobreesfuerzos	Tropezones	Vibraciones	
Excavación masiva	x	x							x	x							x				
Perforación	x	x					x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	
Inyección						x					x					x					x
Perfilado	x		x							x											
Colocación de acero				x	x			x				x							x		
Encofrado				x			x	x					x		x	x			x		
Vaciado de Muro				x	x	x						x							x		x
Desencofrado				x					x						x					x	
Tensado						x													x		

Tabla 5. 7 Seguridad en obra Auto Perforantes.⁵³

⁵³ Fuente propia.

5.4 Resumen comparativo

Finalmente a manera y de manera rápida y concisa para los fines de comparación se presenta de resumen se presenta un cuadro con las 3 características importantes entre las técnicas evaluadas. Además debemos recordar que estas valorizaciones y detalles mostrados en este capítulo son aplicables para los tipos de suelos arenosos a los que se refiere en principio en este estudio.

Las consideraciones que hay que tener en cuenta será más que nada a la hora de excavaciones de taludes y habrá que controlar momentáneamente, hasta que se ejecute la realización de los anclajes, la estabilización de taludes en las cuales hay que tener sumo cuidado y tomar las precauciones para evitar los avenimientos o vuelcos del terreno. Con técnicas que el área de trabajo permita.

En la tabla 5.8 se presenta un resumen comparativo en rendimiento (tiempo o plazos), seguridad y costos:

Técnica de Anclaje	Rendimiento (anclajes por día) cada uno de 9 ml	Seguridad* (medido como nivel de riesgo)	Costos ml incluyen hasta el tensado (S/.)
1. De cables Post tensados temporales	2 a 4	6	333.85
2. Suelo enclavado	6 a 8	5	250.00
3. Auto Perforantes	10 a 12	3	850.00

Tabla 5. 8 Cuadro comparativo entre técnicas de anclaje.⁵⁴

*Seguridad según la Guía Técnica de Registros del Ministerio del trabajo y promoción del empleo (2007) recomienda usar las matrices siguientes como referencia de riesgo y relacionarlas con consecuencias y probabilidades.

Magnitud	Riesgo
1	No es significativo
2	Bajo
3	Moderado
4	Medio
6	Alto
9	Muy alto

Tabla 5. 10 Matriz de Valoración⁵⁵

		Consecuencias		
		Leve	Moderado	Grave
Probabilidad	Baja	1	2	3
	Media	2	4	6
	Alta	3	6	9

Tabla 5. 9 Clasificación del Riesgo²²

⁵⁴ Fuente propia.

⁵⁵ Ministerio del trabajo y promoción del empleo (2007). *Guía técnica de registros de seguridad*. Lima.

6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Del presente estudio, se concluye que es fundamental determinar con la mayor precisión posible el campo de esfuerzos que actúa sobre el terreno. Para ello, son importantes los estudios previos de mecánica de suelos para los reconocimientos en campo y las propiedades índices, que serán básicas para el cálculo a realizar en el diseño y el modelamiento (del suelo propiamente dicho y de los esfuerzos actuantes en el terreno) y, por ende, de las fuerzas de anclajes para mantener la estabilidad de taludes,

Para esto, se usan software auxiliares como Slope/w con el fin de determinar la posible falla del corte del terreno. También, se pueden usar programas más avanzados de diseño de anclajes como GGU Retain, o fórmulas manuales propuestas por los distintos métodos conocidos. El método más aplicado en el Perú, el cual es usado en el presente estudio, es el método alemán de Kranz.

Los factores que influyen en las fallas de un talud pueden ser externos e internos. Los externos se dan por incrementos de tensiones provocadas por el hombre, en este caso por cortes muy pronunciados o excavaciones empinadas. Los métodos de estabilización de taludes y los cálculos que estos requieren son muy simplificados. Los métodos más utilizados para esto son los métodos de Fellenius y el de Bishop.

Las técnicas de anclaje tienen similitudes y diferencias entre sí, lo cual, también, da referencias sobre las ventajas y desventajas de utilizar ciertas técnicas. Esto es respecto al costo, tiempo y seguridad, factores importantes y determinantes al momento de elegir la técnica de anclaje a usar. Sin embargo, también, es importante la experiencia y el conocimiento de la técnica, así como que haya personal capacitado en cada instante de la realización de la obra.

Se pudieron observar elementos en común entre las tres técnicas: el uso de perforadora (una más compleja que otra), un refuerzo (cables o acero), inyectora, y una tensadora. Independientemente de la técnica que se use, un anclaje consta de 3 partes que son las siguientes: cabeza y placa de apoyo, zona de bulbo o anclaje y una zona o longitud libre.

Para el caso del presente trabajo, están divididos según el material: por cable (postensado temporal), por barra sólida (Suelo enclavado) y por barra auto perforantes (tirabuzón).

El Suelo enclavado es un sistema con versatilidad de aplicaciones y ventajas que ofrece a comparación de otros a métodos convencionales. Así pues, el Suelo enclavado tiene ventajas técnicas y económicas como las mostradas en el capítulo 6 del presente trabajo de investigación, donde se resaltan el bajo costo, la relativa rapidez de instalación de las inclusiones (“nails”) la cual es considerablemente más corta que los anclajes y la capa de lanzado relativamente más delgada.

Únicamente se necesita equipo liviano de construcción para colocar las inclusiones, así como equipo simple de lanzado e inyección de lechada. El llenado de las perforaciones con lechada generalmente se hace por gravedad. Esta característica puede ser de particular importancia en lugares de difícil acceso.

Debido al gran número de inclusiones que se encuentran conectados por medio de varillas de refuerzos transversales, la falla de alguna no es determinante, ni afecta la estabilidad del sistema, como es el caso de los anclajes convencionales, ya que estas actúan en bloque.

Las estructuras con suelo enclavado son más flexibles que las estructuras rígidas convencionales. Consecuentemente, estas estructuras pueden conformar un terreno perimetral con capacidad de soportar mayores movimientos diferenciales del terreno en todas direcciones.

La técnica de anclaje con barras auto perforantes son aún más rápidas en temas de rendimiento, ya que proceden a actuar en un sistema 3 en 1. Estas hacen el procedimiento de perforado más la colocación del refuerzo y más la inyección de concreto en un solo paso, con lo que se ahorra tiempo de horas hombre y se aumenta la productividad. Esto, finalmente, da un alto rendimiento en perforación.

El sistema de anclaje auto perforante presenta, también, algunas desventajas. Es un sistema muy costoso; sin embargo, suele ser muy rentable a nivel global. Si se prepara un análisis de costos finales, con el tiempo puede resultar un ahorro si es que, a su vez, se cuenta con un personal capacitado.

Teniendo en cuenta el terreno sobre el que se trabaja (arenas), los anclajes de cables son preferibles a comparación de los de barra, porque pueden soportar movimientos de terreno evitando una rigidez excesiva en la cabeza que podría conllevar su rotura.

Las ventajas que presentan los anclajes de cables son, entre otras, que pueden tener cualquier longitud sin despuntes ni uniones. Asimismo, otra ventaja es que las capacidades de cargas son casi ilimitadas y finalmente resulta ser económico para más de 45 toneladas y longitudes mayores de 10 metros. Las tensiones de trabajo habituales son del 75% del límite elástico para anclajes provisionales.

Para cualquiera de los casos, la lechada de cemento será resistente a la presencia de sustancias agresivas al terreno.

Las dosificaciones de agua/cemento en peso serán menores a 0.4 en protección anti corrosión en contacto con la armadura y estará entre 0.4 a 0.6 en la zona de formación del bulbo.

Se admitirá la utilización justificada de aditivos si así lo requiriese.

Posteriormente para el tensado, se definirá en el proyecto la secuencia del tensado, los escalones de carga, y los métodos de tensado. Dicho tensado se debe efectuar en una sola operación tensando anclajes de forma alterna y para ello se tendrá en cuenta la rigidez y tensión de los elementos de reparto de carga.

Una vez que las losas son construidas unidas al muro pantalla y éstas pueden actuar como puntales para resistir los empujes laterales, se procede a destensar los anclajes.

Una ventaja de utilizar la estructuración de muros pantalla fue que ésta minimiza los desplazamientos horizontales en comparación con otros tipos de estructuras de entibación (muro Berlinés, por ejemplo). Por ende, existen menos probabilidades de que se produzcan asentamiento significativos en el trasdós de las pantallas donde se encuentran emplazadas estructuras vecinas como lo son las calles, casas y edificios.

Finalmente, del cuadro comparativo expuesto en el capítulo 6 y una vez explicadas todas las características, las ventajas y desventajas de cada técnica y condiciones además de resaltar las propiedades del terreno (arenas) y la zona (Perú) donde se tiene mejor desarrollada la técnica de muros anclados pos tensados temporales (cables), y por ende la mano de obra totalmente calificada resaltando muy bien las condiciones de seguridad en el trabajo, como recomendación final optaría por utilizar la técnica de anclajes de cables pos tensados temporales.

Finalmente, se recomienda utilizar la técnica de anclajes de cables pos tensados temporales. Esto luego de revisar el cuadro comparativo expuesto en el capítulo 6 y de explicar las características, ventajas y desventajas de cada técnica; además, se tomaron en cuenta las propiedades del terreno (arenas) y la zona (Perú), donde se tiene mejor desarrollada la técnica de muros anclados pos tensados temporales (cables). También, se tomó en cuenta lo referente a la mano de obra capacitada y la seguridad en el trabajo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (1996). *Standard specifications for highway bridges*. Washington, D.C.: AASHTO.

Ayala, F et al. (1987). *Manual de taludes*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Bustamante, Michel (1988). *Un método para el cálculo de los anclajes y de los pilotes inyectados*. París.

Blanco, A. (2008). *Conferencia sobre calzaduras*. Lima: ASOCHEM. Recuperado de <http://www.scribd.com/doc/28263279/Calzadura-Conceptos-y-Aplicacion>

Cabellos, G.A. (2012). Análisis comparativo de la estabilización de taludes mediante el uso de muros anclados y calzaduras en la construcción de edificaciones. *Tesis para optar el título de Licenciado en Ingeniería Civil*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Camelo, C. (2012). *Anclajes y Soil Nailing*. Recuperado de <http://prezi.com/yycycmxxaxtf/anclajes-y-soil-nailing/>

Carlos A. Lazarte, et al (2003). *Geotechnical Engineering Circular No. 7. Soil Nail Walls*. Estados Unidos.

Cortegana, E. (2012). *Descripción teórica de las calzaduras y muros anclados en la grava de Lima*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú

Deutsches Institut für Normung (instituto alemán de normalización) DIN 4085 (1990). *Subsoil: Analysis of Earth pressure, basic principles for calculation*. Berlin.

De Matteis, Á. (2003). *Estabilidad de Taludes*. Santa Fe: Universidad Nacional de Rosario.

Federal Highway Administration (1999) . *Geotechnical Engineering Circular N° 4. Ground Anchor and Anchored Systems*. Publication N°4. Atalanta.

Geofortis Soluciones Geotecnicas Confliables (2013). *Proceso Constructivo de Muro Anclado*. Recuperado de <http://www.geofortis.co.cr/descargas/Procedimiento%20constructivo%20muro%20anclado.pdf>

Grases, J., Contreras, I. & Grases, G. (1997). Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado frente a deslizamientos, sismos y otras amenazas naturales. Caso estudio. Recuperado de <http://www.disaster-info.net/watermitigation/e/publicaciones/EstudioVEN/cap3.PDF>

Hanna, T. (1982). *Foundations in Tension: Ground Anchors*. New York: Trans. Tech.Publications & McGraw-Hill.

Jimenez, J. & Muzas, L. (1980). *Geotecnia y Cimientos III*. Madrid: Editorial Rueda.

Mozó, D.E. (2012). *Análisis y diseño de muros pantalla en suelos arenosos. Tesis para optar el título de Licenciado en Ingeniería Civil*. Chile: Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Mozó, D. E. (2012). *Proyecto de muros pantalla para el edificio centro plaza*. Chile: Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Murillo, T & Ortuño, L. (s.f.). *Anclajes al Terreno*. Recuperado de http://www.delegacion.camino.upm.es/apuntes/ICCP/6_sexto/Cimentaciones/ANCLAJES%202010.pdf.

Murillo, T & Ortuño, L. (2010). *Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles. Anclajes y Bulones*. Recuperado de <http://www.urielyasociados.es/img/formacion/ponencia1.pdf>

Pantoja, J. (2008). *Protección de taludes utilizando el método de Soil Nailing*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Pérez, M. (2004). *Anclajes y Sistema de Anclajes*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional.

Pilotes Terratest

Pilotes Terratest: Soil Nailing. Consulta: 27 de noviembre de 2014.

<http://www.terratest.com.pe/productos.php?id=13>

Ramirez, R., Santos, M., Sosa, L. (2004). *Procesos Constructivos Aplicados a Cimentaciones Profundas en El Salvador*. Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Civil.

Rankae, A & Ostermayer, H. (1969). Laboratorio de Transporte y Mecánica del Suelo. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. *Estabilidad de Pantallas Ancladas*, 75.

Reglamento Nacional de Edificaciones (2015). Norma Técnica de Edificaciones E.050 Suelos y Cimentaciones. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento

Reglamento Nacional de Edificaciones (2010). Norma G.050 “Seguridad Durante la Construcción”. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Salon, E. (2013). *Colapso de suelos arenosos por presencia de sales*. Recuperado de <http://documents.tips/documents/178252268-colapso-de-suelos-arenosos-por-presencia-de-sales-562d1119d8f95.html>

Saucedo, M., Raygada, L. & Matos, G. (s.f.). *Aspectos constructivos, consideraciones de diseño y monitoreo de muros anclados en excavaciones profundas. Caso Práctico: Edificio Cipreses Lima*. Lima: Pilotes Terratest Peru SAC.

Schnabel, H. (1982). *Tiebacks in foundation Engineering and Construction*. New York: McGraw-Hill.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (2002). *Manual de Construcción Geotécnica. Tomo I*. México, 2002.

Soil Tec Cimentaciones y Estructuras
Soil Tec: Soil Nailing. Consulta: 27 de Noviembre 2014. Recuperado de:
<http://www.soiltec.com.gt/index.php/servicios/soil-nailing>

Suarez, J. (2015). *Seminario de Estructuras de Contención*. Recuperado de <http://myslide.es/documents/1379-10-muros-anclados.html>

Terzaghi, K. & Peck, R. (1976). *Mecánica de suelos en la Ingeniería Práctica*. Editorial El Ateneo S.A.

TITAN (s.f.). *Micropilotes, anclajes y bulones autoperforantes*. Recuperado de http://www.ischebeck.es/assets/files/geotecnia/prospekt.geotechnik_universal_es.pdf

Ucar, R. (2004). *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid: Carlos Lopez Jimeno.

Zegarra, J. & Zavala, G. (2011). *Mecánica de Suelos*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.