



**Análisis del diseño y construcción del muro de contención en pilas del proyecto residencial
Nido**

Sergio Andrés Escobar Henao

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Carlos Alberto Riveros Jerez, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Escobar Henao, S. A. (2022)
Referencia	Escobar Henao, S. A. (2022). <i>Análisis del diseño y construcción del muro de contención en pilas del proyecto residencial Nido</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Para mi madre, Gloria, mi padre, Mauricio y mi hermana, Laura.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional en todo momento, su constancia, consejos y compromiso conmigo y mi hermana fueron necesarios para este trabajo que representa una meta cumplida.

A mi hermana por su complicidad y compañía.

A mis tíos, primos y abuelos por darme confianza y apoyarme en todo momento.

A Caren, mis amigos y mis compañeros.

A mi profesor y asesor de práctica Carlos Riveros por compartirme su valioso conocimiento.

A los ayudantes, oficiales e ingenieros de la obra Nido por lo aprendido de cada uno de ellos.

Y finalmente a mi querida Universidad de Antioquia y todos sus profesores y personal.

Tabla de contenido
Contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1 Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2 Marco teórico	15
2.1 Proyecto Nido.....	15
2.2 Definición, uso y tipos de muros de contención	15
2.3 Anclajes activos.....	17
2.3.1 Bulbo:.....	17
2.3.2 Zona libre:	18
2.3.3 Cabeza:.....	18
2.4 Equilibrio Límite	18
2.4.1 Factor de seguridad (F.S).....	18
3 Metodología	19
4 Resultados y análisis	21
4.1 Etapa de diseño.....	21
4.1.1 Concepción de la contención	21
4.1.2 Proceso de análisis para el diseño	23
4.1.3 Pilas perforadas.....	26
4.1.4 Diseño de anclajes.....	28
4.1.5 Diseños.....	29

4.2 Etapa constructiva	32
4.2.1 Marcación de ejes, ubicación de centros de pilas y labores iniciales para la excavación	32
4.2.2 Montaje de equipos:	33
4.2.3 Excavación y anillado de pilas manuales.....	35
4.2.4 Instalación de acero de refuerzo y tubería pasante	37
4.2.5 Metodología Tremie para vaciado de pilas manuales:.....	39
4.2.6 Viga cabezal.....	41
4.2.7 Recomendaciones Constructivas, medidas de seguridad y normativas	42
4.2.8 Perforación para anclajes activos y drenes	48
4.2.9 Armado de tensores, llenado e inyección	53
4.2.10 Construcción de dados, tensionamiento y pruebas de carga.....	56
4.2.11 Actividades de emporado y champeado del muro	59
5 Conclusiones	61
Proceso Constructivo:	61
Proceso de diseño:	62
Otras conclusiones:	62
Referencias	63

Lista de tablas

Tabla 1	Factores de seguridad básicos mínimos directos.....	23
Tabla 2	Longitudes totales y de empotramiento de pilas.	25
Tabla 3	Características de anclajes en zona A	30
Tabla 4	Características de anclajes en zona B.....	31
Tabla 5	Características de anclajes en zona C.....	31
Tabla 6	Características de anclajes en zona D	31
Tabla 7	Secuencia de excavación de los tramos de la viga cabezal.	41
Tabla 8	Orden de excavación de pilas.....	45

Lista de figuras

Figura 1 Clasificación de los tipos de muros de contención.....	16
Figura 2 Esquema típico de un anclaje y sus partes.....	17
Figura 3 Ilustración de la contención.....	22
Figura 4 Altura de cortes.....	25
Figura 5 Muro de pilas (de la pila 1 a la 16).....	29
Figura 6 Muro de pilas (de la pila 17 a la 32).....	30
Figura 7 Esquema de anclajes activos.....	32
Figura 8 Ilustración de ejes de referencia horizontales y verticales para marcación de pilas.....	33
Figura 9 proceso de excavación y entibado de una pila manual.....	36
Figura 10 Excavación campana.....	37
Figura 11 Pajarita y ayudantes realizando el descenso de las canastas de refuerzo dentro de la pila.....	38
Figura 12 Ilustración de vaciado con metodología Tremie.....	40
Figura 13 Tramo del muro de contención. Primer plano a viga cabezal.....	42
Figura 14 Localización de sondeos para estudio de suelos.....	43
Figura 15 Muestras de suelos en excavaciones de pilas mecánicas. Pila 8, 67, 139 y 64 respectivamente.....	44
Figura 16 Fotografía de uno de los inclinómetros sobre la viga cabezal del muro de contención.....	47
Figura 17 Informe de deformaciones del inclinómetro 1.....	48
Figura 18 Verificación de inclinación de anclajes.....	50
Figura 19 Perforación para anclajes.....	51
Figura 20 Perforación para drenes.....	52
Figura 21 Armado de torones.....	53
Figura 22 Esquema del diseño de anclaje activo para el muro de contención de la obra.....	54

Figura 23 Esquema de detalles para cortes anclaje activo.	55
Figura 24 Tensionamiento de anclajes.	57
Figura 25 Movimiento de tierra en área contigua al muro.....	58
Figura 26 Proceso de limpieza, emporado y champeado de pilas.....	60

Siglas, acrónimos y abreviaturas

m	Metros
in	Inches (Pulgadas)
SPT	Standard Penetration Test (ASTM D-1586)
MPa	Mega Pascales
NSR10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente
GLE	Método general de equilibrio limite
F.S.	Factor de Seguridad

Resumen

Uno de los más grandes retos para la construcción de la unidad residencial Nido, ubicada en el sector de pan de azúcar en sabaneta, Antioquia fue la ejecución de la contención de más de cien metros de largo empleada para estabilizar el talud contiguo a la zona de parqueaderos. En este informe se presenta un análisis de la planeación y diseño de esta obra y una guía del proceso constructivo llevado a cabo para la ejecución de dicha estructura. Lo anterior, teniendo en cuenta el reglamento colombiano de construcción sismorresistente, las teorías de diseño, las indicaciones dadas por los geotecnistas y diseñadores estructurales a cargo de la planeación y las buenas prácticas de los procesos constructivos en este tipo de obras. Por ende, se busca plantear un boceto general de todos los procesos necesarios para la ejecución de esta obra de contención, teniendo en cuenta las suposiciones asumidas para el diseño, estudios previos, contratiempos constructivos y soluciones.

Palabras clave: muro de contención, pilas manuales, pantalla de pilas, anclaje activo

Abstract

One of the greatest challenges for the construction of the Nido residential unit, located in the Pan de Azucar sector in Sabaneta, Antioquia, was the execution of the retaining wall of more than one hundred meters in length used to stabilize the slope adjacent to the zone of parking lot. This report presents an analysis of the planning and design of this work and a guide to the construction process carried out for the execution of said structure. The foregoing, considering the Colombian earthquake-resistant standard, the design theories, the indications given by the geotechnicians and structural designers in charge of the planning and the good practices of the construction processes in this type of works. Therefore, it seeks to propose a general sketch of all the processes necessary for the execution of this containment, considering the assumptions made for the design, previous studies, construction setbacks and solutions.

Keywords: retaining wall, hand-drilled piles, screen of piles, active anchorage

Introducción

Las obras de contención son estructuras vitales para el resguardo de la vida y las edificaciones de cara a los movimientos en masa o deslizamientos de tierra. Además, en países como Colombia con una topografía usualmente escarpada los muros de contención y mecanismos para la estabilización del suelo se hacen más que recurrentes necesarios para gran cantidad de obras no solo viales sino también residenciales o comerciales. Además, se pueden encontrar una gran variedad de contenciones o métodos de estabilización de laderas y taludes y la implementación de cada una de estas dependerá de muchos factores como el tipo de suelo, la inclinación de la pendiente, el nivel freático, los diseños definidos para la obra, entre muchos otros factores.

Una de las contenciones posibles es la pantalla de pilas ancladas. Este tipo de muro de contención significa una ventaja en cuanto a la no afectación de obras vecinas además de presentar un nivel de confiabilidad muy alto. Por esta y otras razones, este fue el sistema de contención que se definió en la unidad residencial Nido como soporte al talud contiguo al edificio de parqueaderos. Además, significó gran parte de la actividad de práctica académica que se llevó a cabo en obra por lo que se pudo estar de cerca en casi todos los procesos constructivos necesarios para su ejecución.

Las consideraciones de diseño, metodologías y lineamientos tomados por los ingenieros geotecnistas y diseñadores estructurales suelen estar especificadas, pero no muy cercanas a los ingenieros constructores que, pueden usar dichos conceptos como fundamentos prácticos a la hora de tomar decisiones. Además, los métodos constructivos suelen ser muy específicos y extensos para ingenieros que no hayan tenido experiencia previa en la construcción de elementos de esta tipología. Por lo anterior, este informe busca identificar y plasmar los aspectos más básicos del diseño de una contención de estas características para aportar nociones útiles a los constructores e ingenieros practicantes para el entendimiento del sistema funcional del muro de contención, además de un informe riguroso del proceso constructivo llevado a cabo, teniendo en cuenta los análisis de cada uno de estos pasos y sin dejar a un lado los posibles contratiempos y soluciones que se pueden dar durante cada etapa del proceso constructivo.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar la ejecución del muro de contención de pilas ancladas construido en el proyecto Nido teniendo en cuenta el diseño y planeación, y documentando el proceso constructivo llevado a cabo.

1.2 Objetivos específicos

- Detallar a cabalidad el proceso constructivo realizado incluyendo los contratiempos y dificultades encontradas en el proceso.
- Realizar el análisis detallado de las memorias estructurales y estudios de suelos para la evaluación del diseño contratado.
- Construir una guía básica para la identificación de los pasos generales presentes en la planeación, diseño y construcción de una contención de esta tipología.

2 Marco teórico

2.1 Proyecto Nido

La empresa CENTRO SUR S.A. planeó e inició la construcción de un proyecto residencial de apartamentos en la zona Pan de azúcar del municipio de Sabaneta. La cual contaría con dos torres de treinta y siete pisos cada una y una plataforma de parqueaderos, zona de piscinas, canchas, zonas verdes, paneles solares, etc. Además, para dicha construcción se tuvo la necesidad de realizar el diseño de dos tipos de pilas: las primeras pertenecientes a la cimentación de las torres que serían de tipo mecánico y las segundas, de excavación manual, para el muro de contención encargado de estabilizar el suelo en el talud.

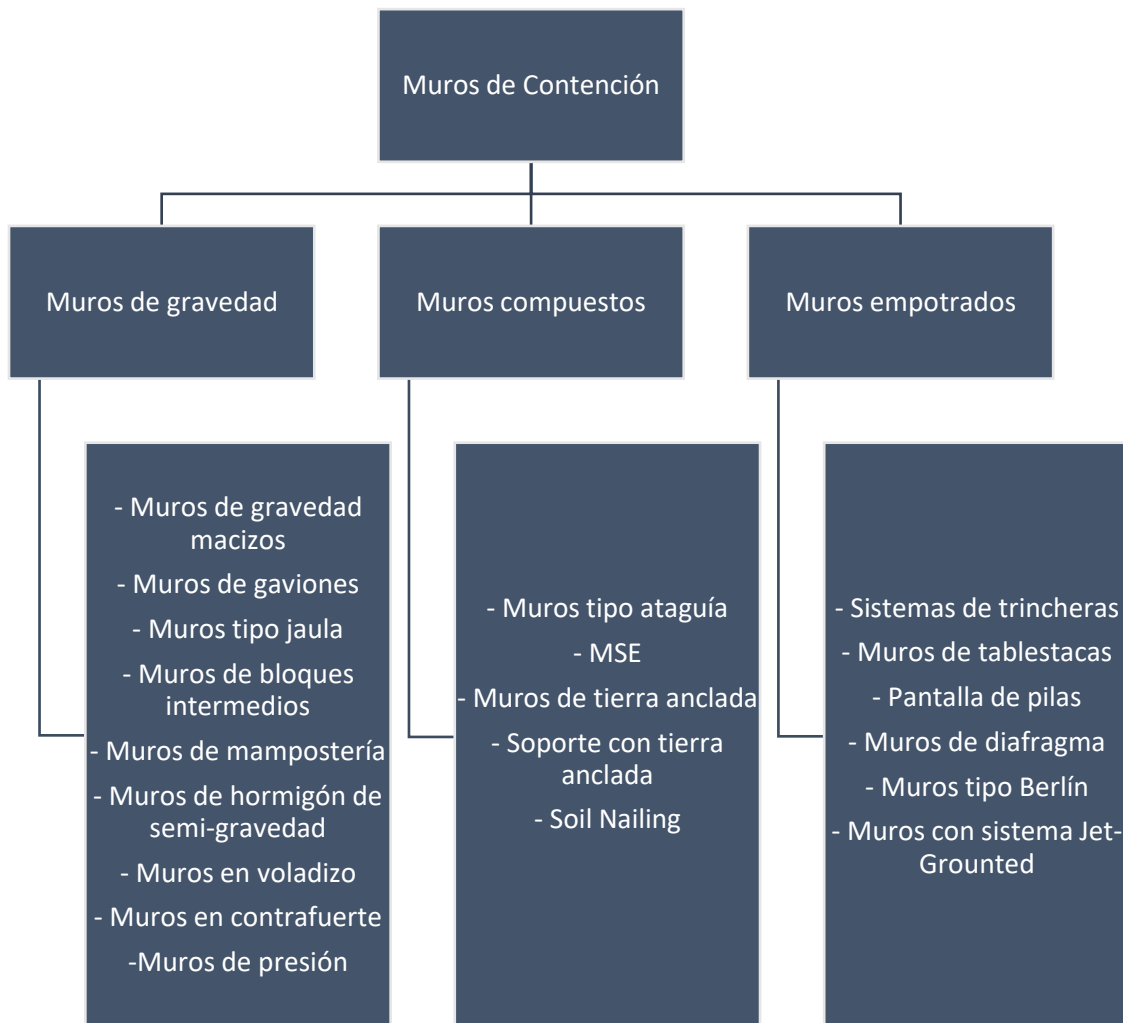
El proyecto además está certificado como un proyecto EGDE y se posiciona como una de las obras más innovadoras de la constructora, apuntando a la sostenibilidad ambiental, el contacto con la naturaleza y la modernidad.

2.2 Definición, uso y tipos de muros de contención

Los muros de contención son estructuras de diversas formas y materiales diseñados con el fin de contener masas de suelo propensas a deslizarse o presentar superficies de falla que pongan en peligro la vida de las personas y/o la estabilidad de edificaciones. Dichas estructuras de contención se pueden clasificar en tres tipos generales como se muestra en el diagrama a continuación propuesto por (Clayton & et al, 2014) (Mattos, 2019).

Figura 1

Clasificación de los tipos de muros de contención.



Nota. Adaptada de: (Mattos, 2019)

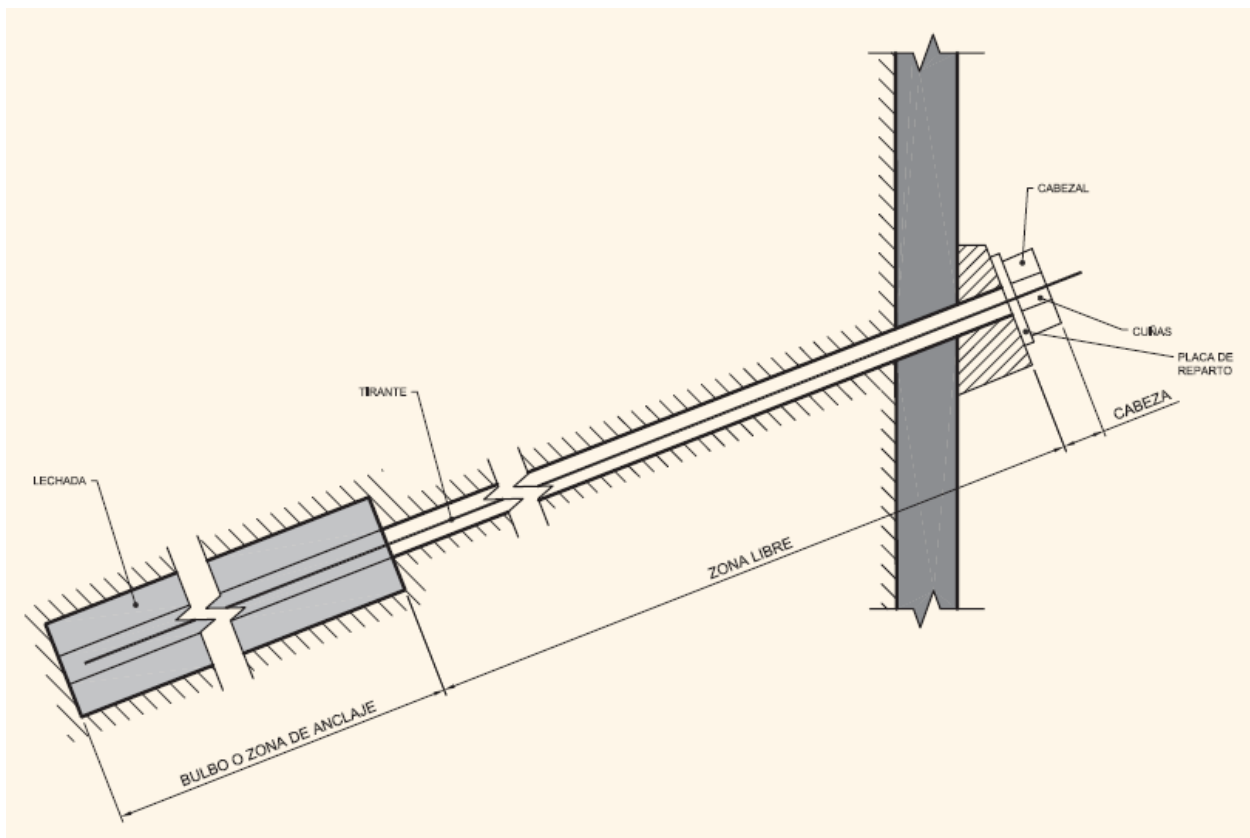
Para este informe, nos enfocaremos específicamente en las **Pantallas de pilas**, tipo de muro que pertenece, como lo muestra el esquema anterior, a la categoría de muros empotrados. La longitud de empotramiento de las pilas será, más adelante, uno de los parámetros más importantes en el diseño y dependerá de las solicitaciones que genere la masa de suelo a la estructura.

2.3 Anclajes activos

En general, un anclaje es un elemento estructural diseñado para transmitir esfuerzos de tracción desde la superficie del terreno (normalmente donde se está construyendo o ya hay una contención) hasta el suelo a profundidad. Ahora bien, un anclaje activo como los usados en el muro de contención que es motivo de estudio en este informe es aquel que se somete a un tensionamiento después de haber sido construido de no menos que el 50% de la carga final para la que está diseñado en el proyecto. Además, los anclajes, constan básicamente de tres zonas o componentes: El bulbo, la zona libre y la cabeza. (Dirección General de Carreteras [DGC], 2001). Lo anterior puede evidenciarse a mayor profundidad en la figura 2.

Figura 2

Esquema típico de un anclaje y sus partes.



Nota. Tomada de (Dirección General de Carreteras [DGC], 2001).

2.3.1 Bulbo:

Es la zona a mayor profundidad en el anclaje, además de la que se adhiere al suelo a través de lechada, la cual es una composición de agua y cemento dosificados de tal forma que garanticen una resistencia de diseño una vez fraguada.

2.3.2 Zona libre:

Es la zona que permite el libre alargamiento del tensor y los torones y no se adhiere por medio de lechada. Esta entre la cabeza del anclaje y la zona de bulbo (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2001)

2.3.3 Cabeza:

Esta es la parte exterior del anclaje que transmite las cargas de tensión a la estructura compuesta de placa, cuñas y tuercas. (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2001)

2.4 Equilibrio Límite

Este es uno de los métodos más usados en la actualidad para realizar cálculos en obras de contención, estabilización de laderas y suelo reforzado. Lo anterior debido a que el valor del coeficiente de seguridad obtenido no dista mucho del real. En este método se supone una línea llamada superficie de falla y se asume que la porción superior de suelo se desplaza respecto a la inferior y que el suelo en general está en equilibrio estático (Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB), sf). Este método fue también el usado para el diseño del muro de contención que es motivo de estudio en este informe. Adicionalmente, uno de los parámetros más importantes es el factor de seguridad que se describe a continuación.

2.4.1 Factor de seguridad (F.S)

En términos de la geotecnia, el factor de seguridad se define como la razón entre el esfuerzo cortante último que resiste el suelo y el actuante. Este primero se conoce también como esfuerzo de falla. (Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, 2010)

Para valores de F.S iguales o menores a 1 se dice que la falla del suelo y posterior desplazamiento de las secciones separadas por la superficie de falla son posibles. Así, mediante el factor de seguridad se calcula cual es el ángulo máximo que puede tener un talud sin contención para no fallar, usualmente conservando unos puntos de seguridad iniciando con un F.S. de 1.3 para taludes temporales y 1.5 para permanentes. (Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB), sf)

3 Metodología

Se realizó un trabajo apoyado en diferentes aspectos con el objetivo de proveer la mayor cantidad de puntos de vista posibles acerca de la ejecución completa de un muro de contención como el que es motivo de estudio en este trabajo. Lo anterior para tener una visión holística de lo que comprende un proceso combinado de diseño y construcción. Por ende, fue necesario generar un plan de recolección de información que abarcó tanto aspectos prácticos en obra, como revisiones de documentos y memorias de cálculo, hasta la investigación y consulta de textos académicos y de diseño sobre disciplinas relacionadas con los suelos, las estructuras, las aguas, los procesos constructivos entre otros. Así pues, se pueden considerar a los siguientes como los pasos realizados para ejecutar este informe:

1. Inicialmente, se obtuvo experiencia a través de la práctica académica en la obra observando de cerca y haciendo parte de cada uno de los procesos constructivos que se mencionan más adelante en este trabajo. Viendo de primera mano los aciertos y las falencias que se cometen a la hora de ejecutar el proceso constructivo. Además de los imprevistos y las formas de manejarlos y superarlos. Esta etapa constó también de una experiencia muy variada en cuanto a la participación en el proceso, ya que se pudo observar de cerca el despacho de los materiales para cada una de las actividades constructivas, el transporte de herramientas e insumos, el manejo del personal y maquinaria pesada y de contratistas, la implementación de la seguridad en la obra, la ejecución de actividades y la revisión técnica por parte del equipo de ingeniería e interventoría presente.
2. Teniendo como base la documentación de la obra provista por la empresa, se procedió en esta etapa a leer y analizar cada uno de los documentos técnicos referentes al muro de contención en pantalla de pilas. Estos fueron los estudios de suelos, las memorias de cálculo de las pilas y los diseños de los anclajes activos además de las recomendaciones constructivas de los Ingenieros especialistas en suelos y estructurales que participaron en dichos diseños incluyendo los correos enviados a la obra que quedan guardados

dentro de las bitácoras como guías para los procedimientos constructivos y las soluciones a las eventualidades que puedan ocurrir.

3. Posteriormente se realizó la consulta e investigación en textos académicos de los temas técnicos de diseño, construcción, seguridad en obra, normativa, entre otros.
4. Teniendo en cuenta la necesidad de información y puntos de vista necesarios para la realización de los objetivos y el alcance planeado para este informe, fue necesaria también la consulta de diferentes estudios, tesis, trabajos de grado e informes de prácticas realizados anteriormente con el objetivo de nutrir al trabajo no solo de la experiencia propia sino de una general.
5. Como parte final Se realizó la observación de material audiovisual presente en la web para los procesos constructivos con el fin de poder realizar un contraste y hallar también las similitudes entre los mismos.
6. Como parte final para elaborar este informe se plasmó el proceso completo en orden para ejecutar una obra de este tipo haciendo un análisis detallado en cada una de las partes para entender mejor el procedimiento realizado y su finalidad.

4 Resultados y análisis

4.1 Etapa de diseño

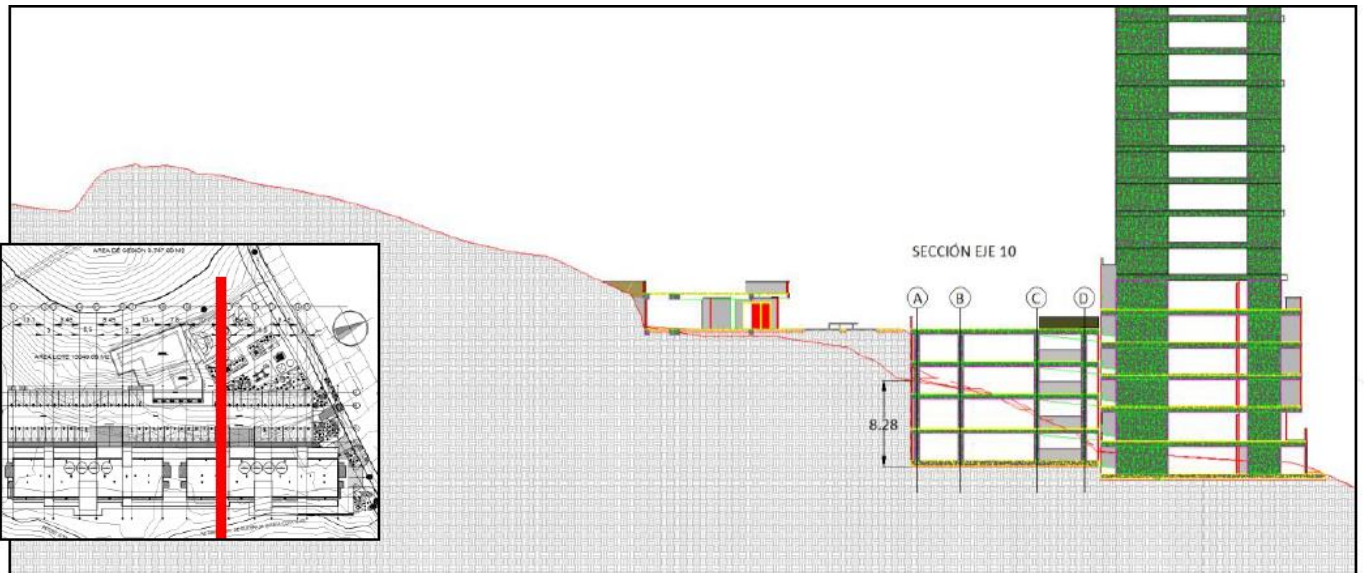
4.1.1 Concepción de la contención

Se añade a continuación las consideraciones y decisiones tomadas por la empresa de geotecnia y estudio de suelos a la hora de proponer el diseño de la contención y se da también un análisis de cada una de estas consideraciones:

Inicialmente se hace referencia al tipo de suelo presente en la ladera a contener. Los suelos predominantes en las capas superiores de estas zonas obedecen principalmente a depósitos limo-arenosos y limo-arcillosos. Por lo tanto, y teniendo en cuenta la presencia de suelos arenosos en gran parte de la ladera, los consultores definieron la inviabilidad de refuerzo de suelo pernado debido a la inestabilidad de este cuando se encuentra en suelos saturados. (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)

Se recomendaron pilas como contención y anclajes que suplan el desconfinamiento del suelo a medida que se va excavando.

En la figura 3, se muestra una vista de perfil en dirección del eje longitudinal de la contención en donde se puede observar el corte a realizar para la ejecución de la obra y la magnitud del talud a contener. Además de la ubicación del muro de contención respecto al edificio de parqueaderos y a las torres de apartamentos.

Figura 3*Ilustración de la contención.*

Nota. Tomada de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)

El proceso general de diseño, sabiendo ya el tipo de estructura a ejecutar (pantalla de pilas ancladas) puede resumirse en la variación e iteración de la longitud de empotramiento de las pilas, la longitud de bulbo de los anclajes y la tensión de estos, entre otras variables. Además, entre las ventajas expuestas por los geotecnistas y diseñadores para definir este tipo de contención están, entre otras cosas, la mala calidad del suelo y su baja capacidad de carga para lo que, por definición, el sistema de pilas y anclajes es muy útil.

4.1.2 Proceso de análisis para el diseño

En cuanto a la condición de diseño, según la norma NSR 10, se debió escoger un factor de seguridad mínimo de 1.5. Como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Factores de seguridad básicos mínimos directos.

	Fsbm		Fsbum	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
D+L(normal)	1.5	1.25	1.8	1.4
D+L(máxima)	1.25	1.1	1.4	1.15
D+L(normal)+sismo de diseño	1.1	1*	No se permite	No se permite
Taludes- cond. Estática y agua subterránea	1.5	1.25	1.8	1.4
Taludes - cond. Seudo estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño	1.05	1*	No se permite	No se permite

**los parámetros sísmicos de construcción serán el 50% de los de diseño. Tomada de: (Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, 2010) Apéndice H.2.4-1. NSR-10.*

De la misma tabla se puede extraer que el factor de seguridad mínimo para el uso del coeficiente sísmico de diseño es de 1.05.

Se realizó el análisis de estabilidad mediante equilibrio limite, específicamente el GLE. Además, en las zonas posteriores a la contención, siguiendo el reglamento colombiano de construcción sismorresistente, los diseñadores establecieron una sobrecarga de 15 kPa que asemejan la presencia de las construcciones en la zona social.

Se realizaron además los diseños con los perfiles más críticos identificados.

El análisis previo al diseño y con el objetivo de presentar la propuesta por parte de la empresa encargada de la geotecnia al proyecto y a la empresa encargada del diseño estructural de la obra de contención constó de varios puntos específicos: el primero fue la evaluación de los empujes de suelo estáticos e incluyendo sismo sobre la estructura de contención, usando el método de equilibrio límite para calcular las fuerzas que debe soportar la contención y las características de los anclajes necesarios. En segundo lugar, se calculó la capacidad geotécnica de los anclajes, se estableció además el valor límite para la longitud de bulbo de 15 m. Posteriormente, se distribuyen los anclajes en el diseño general del muro y se calcula el factor de seguridad global. Ahora, conociendo la distribución de anclajes y los empotramientos de las pilas, se calculan los esfuerzos internos en las mismas, específicamente momento flector y cortante además de deformaciones y empujes usando software. Finalmente se analiza la estructura global en conjunto, se ajusta y se presenta la propuesta ya conocida. (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)

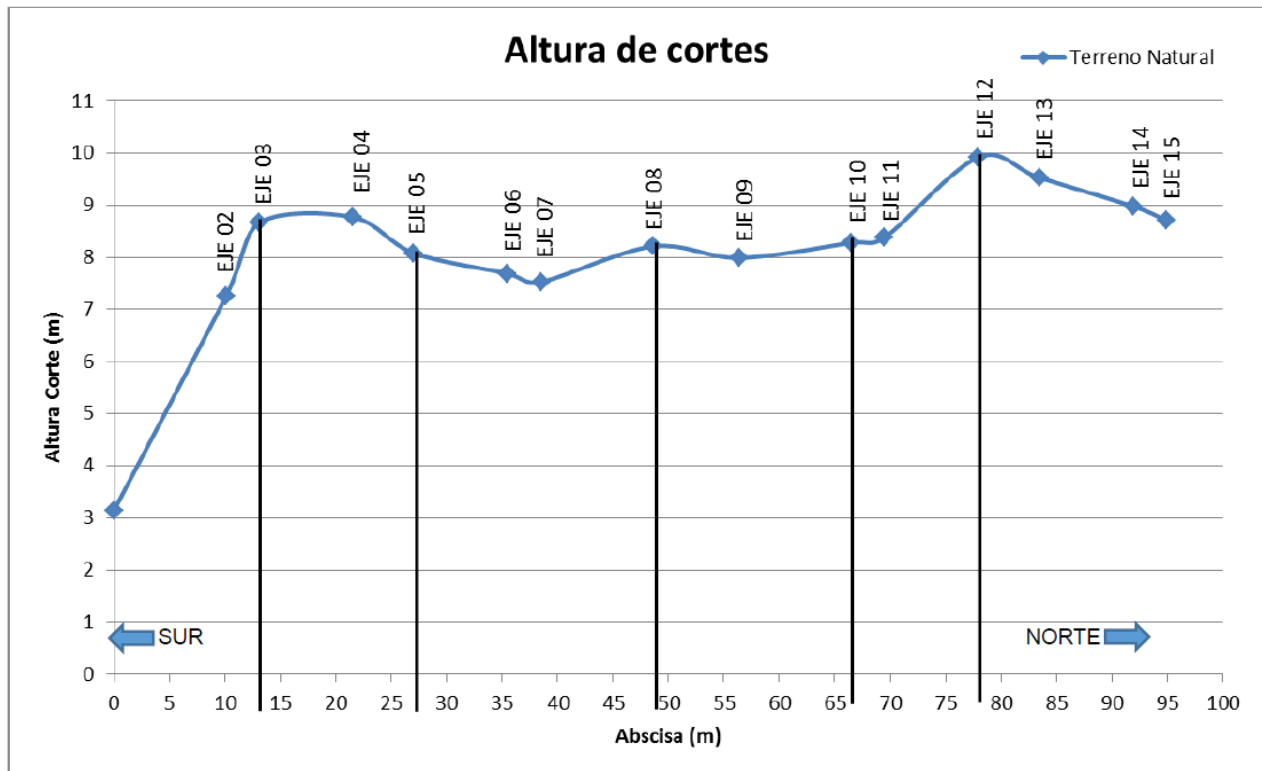
Con base en los análisis previamente mencionados se llegó a la siguiente propuesta: un muro de contención en pilas ancladas con pilas discontinuas separadas 2.8 m entre sí de centro a centro, lo que es aproximadamente equivalente a dos veces en diámetro de cada pila que equivale a 1.2 m perteneciente a la estructura de contención y un anillo exterior de 0.1 m de espesor usado como estructura de entibado para un proceso de construcción de pilas manuales mediante personal pilero. Las pilas contarán con empotramientos mínimos de 4 m a 6 m dependiendo de la zona del muro. Además, debe funcionar el sistema en conjunto por lo que existirá una viga cabezal que una todas las pilas por su extremo superior.

Como es natural, se entiende que existen diferentes tipos de empuje que puede ejercer el suelo sobre el muro y estos dependen sobre todo de que tanto permite deformaciones la estructura. Así pues, la empresa diseñadora realizó modelaciones con elementos finitos en dónde fue claro que la pila permite cierta cantidad de deformaciones que producen un empuje activo. Sin embargo, la condición ideal es que no se presenten deformaciones por lo que se optó por usar un coeficiente de empuje en reposo hasta $z=6$ y posteriormente asumir un empuje activo. (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

Para los cálculos, se eligieron las cinco secciones más críticas. Se muestran a continuación, en la figura 4, una vista frontal en donde se pueden ver las diferentes alturas del terreno para cada una de las secciones escogidas marcadas con una línea vertical de color negro.

Figura 4

Altura de cortes.



Nota. Tomado de: (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

Las longitudes de empotramiento para cada zona variaron dependiendo de las solicitaciones y de las alturas de los cortes. Estas se muestran a continuación:

Tabla 2

Longitudes totales y de empotramiento de pilas.

Zona	A	B	C	D	E
Longitud total de pila	13	13	13	13	15
Longitud de empotramiento	4.4	4.9	4.8	4.7	5.1

Nota. Tomado de: (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

4.1.3 Pilas perforadas

La definición de pilas perforadas o vaciadas in situ como las indicadas para el muro de contención se realizó teniendo en cuenta que existen una gran variedad de pilas y pilotes y también de métodos de instalación o construcción. Por ejemplo, se pueden hincar pilotes mediante maquinaria percutora asimilando la operación de un martillo y un clavo. Además, existen también cimentaciones profundas ejecutadas con diversos materiales por ejemplo acero, madera o concreto con o sin reforzar, etc.

Se pueden entonces definir algunas de las principales razones para la escogencia de pilas de concreto Tremie reforzado con varillas de acero y con diámetro superior a 1 m (1.2m) excavadas manualmente, aunque también algunas de las desventajas. Dichas razones y desventajas se amplían a continuación:

La vibración generada al hincar pilas o pilotes puede, con una alta probabilidad de ocurrencia, generar daños en edificaciones vecinas, problema que se evita realizando la excavación, ya sea manual o mecánica. Además, las pilas excavadas pueden realizarse antes de nivelar el terreno, lo que de hecho se realizó en la obra con las pilas mecánicas usadas como cimentación de las torres. Sin embargo, se presentan además desventajas referentes a la escogencia de pilas perforadas, como por ejemplo la dificultad de ejecutarlas durante periodos de altas precipitaciones debido a los constantes derrumbes internos durante las perforaciones o las situaciones derivadas de los desconfinamientos del suelo que pueden inducir fallas en estructuras cercanas si se permite que la excavación saque ventajas y se amplíe. (Das, 2011)

Las pilas del muro de contención fueron diseñadas principalmente para el soporte de cargas provenientes del suelo, es decir, aplicadas horizontalmente sometiendo a la estructura a flexión con presencia de esfuerzos referentes a cortante y momentos flectores. Además, se concibieron dichas pilas como elementos empotrados en la punta una distancia variable dependiendo de factores como el tipo de suelo a contener, las cargas debidas a construcciones planeadas sobre la ladera y la presión del agua para condiciones del suelo saturado, además de las cargas debidas al sismo de diseño. También, teniendo diferentes valores de empotramiento requeridos en las diferentes zonas de la contención debido a la variación de parámetros importantes como la altura del terreno en cada

zona. Así pues, la concepción de la estructura para los cálculos estructurales (hablando de cada pila individualmente) se realizó como una viga empotrada en uno de sus extremos y con cargas distribuidas en toda la longitud con forma triangular, como se comportan los empujes del suelo. Sin embargo, no solo fueron necesarias las verificaciones debidas a este tipo de cargas, también es vital acotar que la pila sigue siendo un elemento considerado como una cimentación profunda y está encargada también de transmitir su propio peso y el de la viga cabezal que sostiene al suelo en el que está apoyado.

Si una de las pilas transmite una carga vertical superior a la resistencia del suelo que la sostiene, lo llevará al fallo y generará consecuencias nocivas para toda la contención, por lo anterior y dado que en condiciones normales en esta contención algunas pilas presentarían este tipo de comportamiento, la solución más adecuada y finalmente la que realizaron los diseñadores de la estructura fue la de añadir finalizaciones acampanadas de las pilas que presentaban esta problemática.

Una pila acampanada no es más que una pila común con una finalización en forma de campana. (Das, 2011). Lo anterior hace más grande el área de transferencia de cargas lo que, para una fuerza a transmitir constante, provoca una disminución en la presión generada al suelo. Esto, se puede ver en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

En la ecuación 1, P hace referencia a la presión transmitida al suelo, F a la fuerza o carga vertical constante a transmitir y A el área de transmisión de la carga que aumenta para una finalización de una pila tipo campana provocando que la presión disminuya si la carga F es constante.

En cuanto al diseño de mezcla de concreto, son importantes las mismas variables referentes a cualquier otro elemento de concreto reforzado, iniciando por cumplir la resistencia de diseño. Ahora bien, es de vital importancia entender que se trata de elementos muy esbeltos y con presencia de jaulas o canastas de refuerzo por lo que es crucial garantizar la fluidez del concreto para asegurar

el llenado de la mayor cantidad de espacios y evitar poros además de evitar la segregación de la mezcla. Por otro lado, una fluidez aceptable para un concreto a usar en este tipo de estructuras es de al menos 6 in de prueba de asentamiento y un tamaño máximo del agregado de $\frac{3}{4}$ in (Das, 2011). Sin embargo, se definió en los diseños un asentamiento de 8 in que asegura una fluidez aún más alta que la mínima exigida.

Los parámetros anteriores están principalmente pensados para que la pila tenga menos probabilidades de poros, segregación, lavado por lodo o derrumbes y hasta contaminación del concreto. Sin embargo, la calidad de las pilas se ve completamente comprometida al ser vaciada in situ y no se puede garantizar completamente su calidad (Toro Betancur, 2017). Por lo anterior, se requieren procesos constructivos rigurosos y un control de calidad constante.

4.1.4 Diseño de anclajes

En el proceso de planeación y diseño de los anclajes y entendiendo la gran variedad de estos y sus funciones, ventajas y desventajas, se debe también diseñar el plan de acción para la ejecución y construcción de estos teniendo en cuenta sobre todo la zona disponible para el posicionamiento de la maquinaria y personal. Teniendo en cuenta por ejemplo que en la mayoría de los taludes de carreteras se cuenta con un espacio mucho más reducido por ejemplo que en la ejecución de un muro de contención como el que es motivo de estudio en este informe. Así pues, el tipo de anclaje no solo depende del fin planteado por el diseño sino también de las posibilidades de ejecución que se tengas en la zona.

Para diseñar un anclaje es necesario inicialmente conocer los esfuerzos en términos de magnitud y dirección en la estructura a anclar teniendo en cuenta únicamente las cargas nominales, es decir, sin mayorar para luego dimensionar las tres partes principales del anclaje: Longitud libre, longitud de bulbo y tensor o tirante. Finalmente, se hará un análisis de equilibrio global y local. El primero hace referencia a la estructura en general y el segundo a cada anclaje en específico en donde se asegurará el buen comportamiento individual de cada componente evaluando la rotura parcial de la cabeza del anclaje por exceso de tensión o por el fallo de alguno de estos, rotura del tirante a tracción y deslizamiento de este dentro del bulbo, o la pérdida de tensión del anclaje por

deslizamiento del bulbo frente al terreno (Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, 2001).

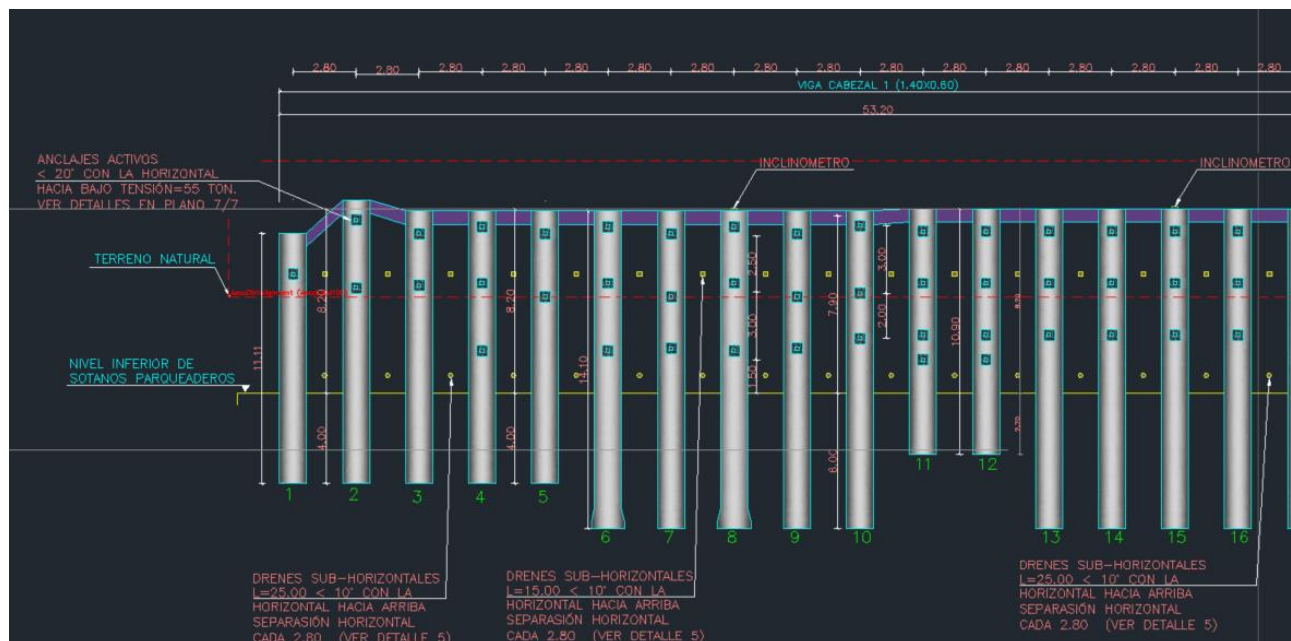
4.1.5 Diseños

Finalmente, fueron presentados los diseños a la obra por parte de la empresa encargada del diseño estructural incluyendo con estos los planos globales del muro agregando además despieces de anclajes y acero de refuerzo.

Se puede observar a continuación, en la figura 5 y figura 6 el plano realizado de la contención completa en dónde se pueden observar todos los detalles del muro. Además, para facilidad en términos de ubicación, calculo y construcción, se dividió al muro en zonas, las cuales tienen una cantidad de pilas. Estas, las pilas fueron enumeradas del 1 al 32 en el eje principal. Cabe acotar que hay una pequeña línea de pilas perpendiculares a las mostradas a continuación que salen del número 32 y que no se muestran en este plano.

Figura 5

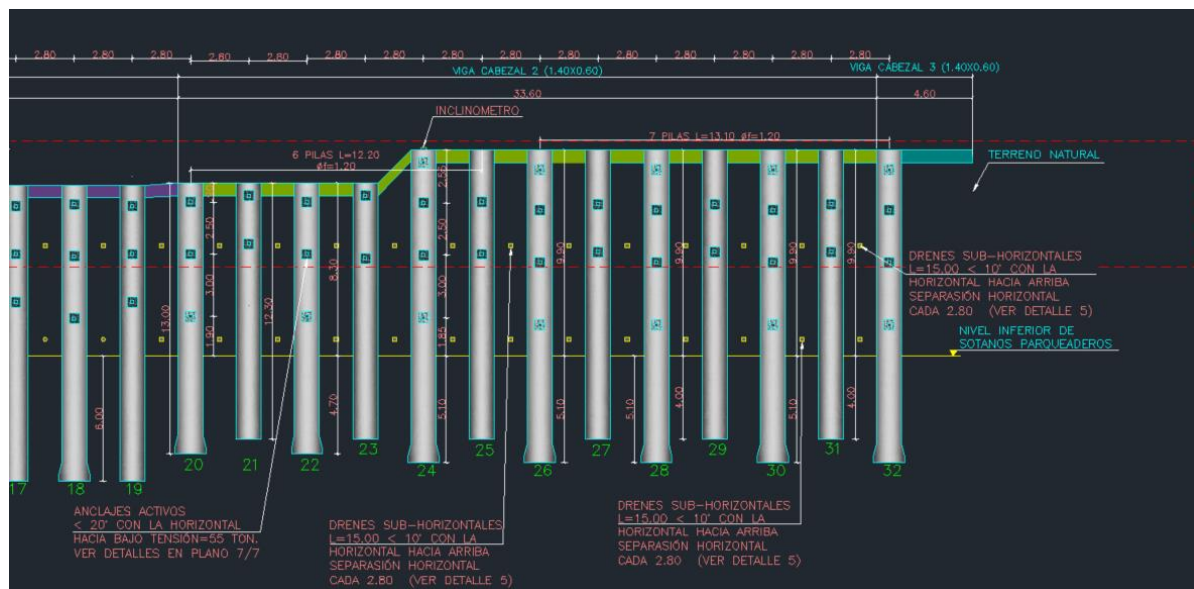
Muro de pilas (de la pila 1 a la 16).



Nota. Tomado de: (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

Figura 6

Muro de pilas (de la pila 17 a la 32).



Nota. Tomado de: (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

Los anclajes fueron diseñados tratando de mantener la uniformidad de la estructura, sin embargo, debido a solicitaciones diferentes en las zonas del muro, los parámetros más importantes tienen variaciones para cada zona del muro de contención. Se presentan a continuación las características de diseño para los anclajes en cada una de las zonas de la contención. Acotando primero que todos los anclajes se realizan a 20 grados de inclinación respecto a la horizontal. En dónde La se refiere a la longitud total del anclaje, Ll a la longitud libre y Lb a la longitud del bulbo. La figura 7 muestra un esquema ilustrativo de dichos componentes.

Tabla 3

Características de anclajes en zona A

ID	nivel	La (m)	Ll (m)	Lb	Z (m)
Np superior	5.9				
Anclaje 1	5	27	11	16	-0.9
Anclaje 2	2.7	25	9	16	-3.2
Anclaje 3	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Np inferior	-6.3				-12.2

Nota. *La tercera línea de anclajes no se incluye en todas las zonas. Tomado de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)

Tabla 4
Características de anclajes en zona B

ID	nivel	La (m)	Ll (m)	Lb	Z (m)
Np superior	5.6				
Anclaje 1	5	28	12	16	-0.6
Anclaje 2	2.7	27	11	16	-2.9
Anclaje 3	0.4	26	10	16	-5.2
Np inferior	-8.3				-13.9

*Nota. *La tercera línea de anclajes no se incluye en todas las zonas. Tomado de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)*

Tabla 5
Características de anclajes en zona C

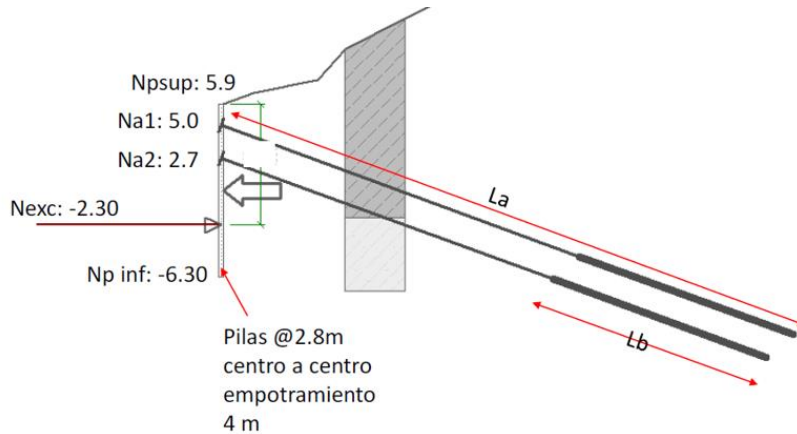
ID	nivel	La (m)	Ll (m)	Lb	Z (m)
Np superior	5.9				
Anclaje 1	5	23	8	15	0
Anclaje 2	2.7	22	7	15	-3.2
Anclaje 3	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Np inferior	-6.3				-12.2

*Nota. *La tercera línea de anclajes no se incluye en todas las zonas. Tomado de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)*

Tabla 6
Características de anclajes en zona D

ID	nivel	La (m)	Ll (m)	Lb	Z (m)
Np superior	6.8				
Anclaje 1	5	24	9	15	-1.8
Anclaje 2	2.7	23	8	15	-4.1
Anclaje 3	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Np inferior	-6.3				-13.1

*Nota. *La tercera línea de anclajes no se incluye en todas las zonas. Tomado de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)*

Figura 7*Esquema de anclajes activos*

Nota. Tomado de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)

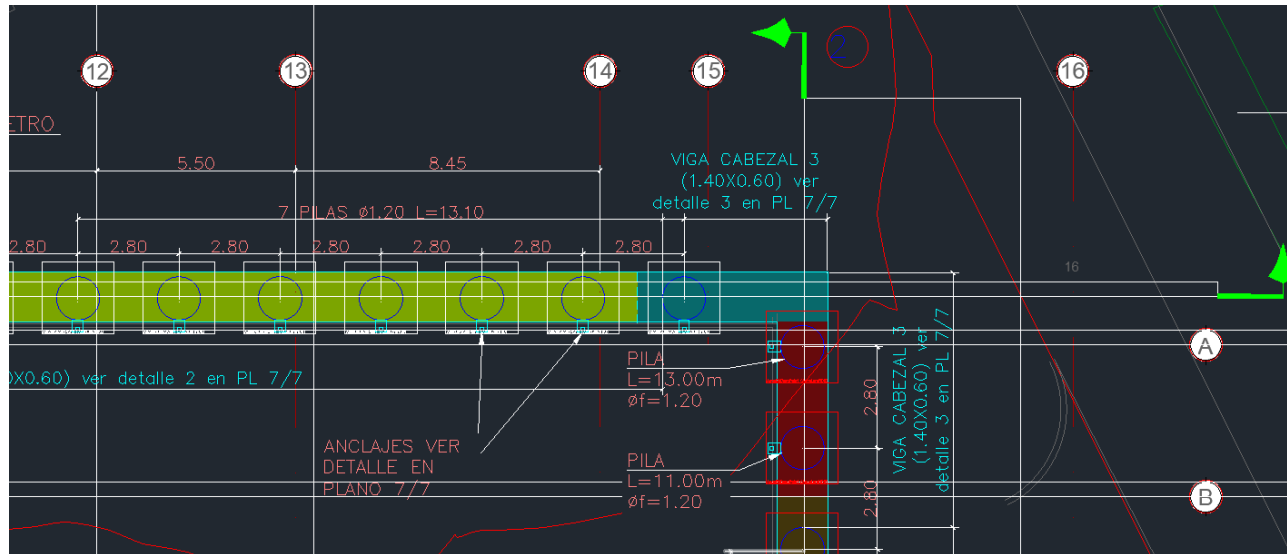
4.2 Etapa constructiva**4.2.1 Marcación de ejes, ubicación de centros de pilas y labores iniciales para la excavación**

Inicialmente, se realizan las actividades de ubicación de las pilas. Esta labor es similar en pilas mecánicas y manuales y se vieron de primera mano en la obra para cada una de estas (pilas mecánicas y manuales): las pilas mecánicas se marcaban diariamente como labor inicial antes de las perforaciones con maquinaria para la cimentación de las torres y ya en tema de este informe, se realizó en fases previas de la obra la marcación de los ejes de las pilas excavadas manualmente para el muro de contención. Dicho trabajo se hizo con ayuda de topografía que, además de realizar labores iniciales también se presentaba al menos cada 15 días con diferentes misiones que se tratarán más adelante en este informe en la sección 4.2.7.

Para la ubicación de centro de pilas, se hizo uso de referencias de ejes marcados previamente por topografía, los cuales se trasladaron per medio de hilos de nylon y desde ellos se realizaba la medición hasta el centro de la pila, haciendo uso de los planos en planta y verificando dichas mediciones. Y después, usando escuadras imaginarias que garantizaran un ángulo de noventa grados entre ejes. Dichos ejes se pueden ver a continuación en la figura 8 que es un fragmento del plano en planta proporcionado por la obra. Allí, se pueden observar las pilas como las circunferencias azules y los ejes verticales en forma numérica además de los horizontales ordenados alfabéticamente.

Figura 8

Ilustración de ejes de referencia horizontales y verticales para marcación de pilas



Nota. Tomado de: (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

4.2.2 Montaje de equipos:

Una vez marcadas las pilas, el personal encargado de la excavación, los pileros, delimitan la circunferencia alrededor del centro de pila y comienzan a excavar. Los equipos usados en esta etapa cumplen tres funciones principales: Movimiento de material y personal, adecuación para comodidad en el trabajo y herramienta de excavación. Ahora, se pueden considerar también los equipos necesarios para el transporte de material (grava, arena, cemento y agua) para el anillado que se tratará en la sección posterior. Siendo así, tienen que ser tenidas en cuenta las carretas o coches, que suelen ser llevadas por ayudantes a cargo de la empresa aparte de la actividad en la pila y/o maquinaria pesada para llevar material a zonas de difícil acceso o conducirlo por distancias largas, como fue el caso en la obra, durante la ejecución del muro de contención en dónde se debió en varias ocasiones llevar dichos materiales a *cuñas*¹ en zonas en donde la excavación aun no estaba a un nivel accesible. Además, es indispensable el control del agua y la correcta evacuación de esta dentro de la pila y para esto también se cuenta con equipos. A continuación, se listarán los más importantes y su uso:

¹ Son elementos de suelo que se permanecen sin excavar después de hacer cortes en el lado del muro desconfinado y que están entre zonas que ya fueron excavadas a una profundidad mayor. Se producen usualmente, para muros de pantalla de pilas, en zonas que presentaron problemáticas para la instalación y tensionamiento de anclajes, tema que se tratará en las secciones 4.2.8; 4.2.9 y 4.2.10.

- **Bomba sumergible:** estas bombas pueden ser automáticas o manuales. Las mismas difieren en que las primeras cuentan con un sensor mecánico llamado coloquialmente en obra como “**Sapo**²” el cual tiene un flotador que activa la bomba una vez el agua sube cierto nivel, las manuales, sin embargo, deben ser activadas por medio de un interruptor. Ahora bien, se observó en repetidas ocasiones que las bombas automáticas presentaban múltiples problemas al usarse en pilas ya que el flotador solía enredarse con las líneas de vida, otros equipos o los arneses. Además de que también se enterraba en el barro por lo que no cumplía al 100% con la activación de la bomba en el momento oportuno y tendía a aumentar el riesgo de quemarla por lo que era evidente que para estas actividades era mucho mejor trabajar con bombas de activación manual así esto supusiera contar con un recurso adicional que es el recurso humano.

Como análisis adicional, se identificó a la manguera de las bombas como uno de los elementos que más fallan al verse constantemente expuesta a la creación de orificios por estar en contacto con todo tipo de objetos y verse sometida a la manipulación de muchas personas. Así pues, se ven como puntos que podrían preverse para limitar las pérdidas de tiempo al tener bombas inutilizadas por daños o tener personal ocupado parchando o reparando las mangueras. Se considera entonces que entre las posibles soluciones a este tipo de problemáticas está la asignación de un personal específico que maneje la bomba y se vuelva experto en los cuidados, prevenciones y manejos de la bomba para evitar reprocesos y pérdidas de tiempo.

- **Taladro:** dicho elemento es usado por uno de los pileros, el cual está al interior de la pila excavando y es de utilidad en circunstancias en que el suelo es muy duro y no permite excavarse con herramientas convencionales o cuando se encuentran rocas y estas deben ser fragmentadas para poder extraerlas de una forma fácil y segura.
- **Garrucha:** es un sistema de soporte y polea que sirve para aligerar la extracción del material y el ascenso y descenso del personal a la pila.
- **Casetón o Toldo:** se suele usar a menudo un casetón de lámina o un toldo colgado de al menos cuatro travesaños para construir un techo provisional para resguardar a los

² Sensor mecánico de una bomba automática que flota con el aumento del nivel del agua y activa la bomba.

trabajadores del sol y la lluvia y para evitar que una cantidad mayor de agua entre a la pila durante las precipitaciones.

- **Baldes:** los baldes son usados para extraer el material excavado y para introducir mezcla para la fundición de los anillos de concreto.
- **Maquinaria pesada:** se usan a menudo pajaritas o retroexcavadoras para llevar material para la fundición de los anillos a lugares de difícil acceso.

4.2.3 Excavación y anillado de pilas manuales

Como requisito de los geotecnistas, se debió excavar las pilas siempre dejando una pila intermedia entre dos pilas que se estuvieran excavando en simultaneo, lo anterior para asegurar que no se llegue a desestabilización del suelo en la zona y no se pierda confinamiento de más que pueda inducir a derrumbes. Además, por temas de tiempo y productividad, se generó una planeación de excavación de un grupo de pilas, mientras al mismo tiempo se tiene personal figurando acero (dado el caso que no venga por algún motivo figurado de fábrica) para anillar posteriormente las pilas con concreto reforzado. Además, se pretende también tener personal realizando el armado del acero para el cual se cuanta con personas capacitadas e insumos como el “alambre de amarrar” o alambre dulce que se usa para unir las barras de acero longitudinal con los estivos y asegurar la unidad de toda la canasta además de las separaciones de diseño en el acero transversal. Por lo tanto, y como es de gran importancia, esta actividad es revisada varias veces por el equipo de ingeniería siguiendo un conducto regular en el que inicia el maestro de obra revisando las canastas de acero y midiendo para asegurarse de que cumplan con los diseños generados previamente. A su vez, el ingeniero residente revisa de nuevo y entrega la canasta al supervisor técnico o interventor de obra para que apruebe los procedimientos y se pueda avanzar.

Es claro entonces la necesidad de generar un buen plan logístico desde incluso las labores iniciales a la construcción ya que se deben tener muchos procesos en simultaneo y cada uno de ellos debe funcionar a la perfección y realizarse a tiempo para poder ejecutar cada labor específica.

Hablando específicamente del proyecto de estudio, se excavaron pilas de diámetros de aproximadamente 1.2m en la parte superior y 1.4m en la inferior, dejando el espacio para los anillos de entibado y la pila con el rigor estructural diseñada para la contención.

En cuanto a la excavación de las pilas, se debe realizar la profundización del anillo con un máximo de 1.5m verticales por día ya que más de esto podría inducir derrumbes localizados de suelo en la zona que finalmente pueden ocasionar daños graves o simplemente incurrir en un mayor gasto de concreto en la etapa de fundición de anillos. Dicho proceso se lleva a cabo mediante la excavación manual y sacando el material sobrante por medio de cubetas como ya se explicó previamente. Posteriormente, habiendo llegado a la profundidad, se ubica la formaletería y el acero de refuerzo del anillo para finalmente realizar el vaciado de concreto que se mezclaba artesanalmente a un extremo de la perforación con una resistencia aproximada de 21MPa. El proceso se muestra más claramente en la figura 9.

Figura 9
proceso de excavación y entibado de una pila manual.



Nota. Tomado de (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

Algunas de las pilas, como fue indicado en la sección de diseño, requerían tener una finalización en forma de campana, lo que finalmente se traduce en una mayor área de transmisión de cargas al suelo. A continuación, en la figura 10, se puede observar la perforación de tipo campana y una ilustración de cómo se realiza el movimiento de material hacia y desde la perforación.

Figura 10
Excavación campana.



Nota. Tomado de: <http://www.mexico.generadordeprecios.info>

4.2.4 Instalación de acero de refuerzo y tubería pasante

El acero de refuerzo, como se habló previamente, es armado fuera de la perforación en tramos que son unidos con alambre de amarrar durante el proceso de inserción a la excavación. Dicho proceso puede hacerse con ayuda de la maquinaria disponible en obra como la retroexcavadora o una grúa. Dicho proceso puede observarse en la figura 11.

Figura 11

Pajarita y ayudantes realizando el descenso de las canastas de refuerzo dentro de la pila.



Nota. Elaboración propia.

Habiendo descendido la canasta de refuerzo, se procede a instalar los pases o pasantes, que no son más que tuberías de PVC ubicadas en la zona dónde se harán las perforaciones de los anclajes, en la parte interior de las perforaciones para las pilas y que sirven para mostrar el camino a las maquinas perforadoras más adelante y, más importante, evitar el daño del acero de refuerzo al realizar las perforaciones a través de la pila. Dicho paso es de vital importancia y debe hacerse con muy buena precisión y asegurándose de que la tubería no se mueva de su lugar ya que pueden presentarse diversas problemáticas si no se realiza de una manera correcta.

Entre los imprevistos que pueden ocurrir con la instalación de los pases están: Primero, podría suceder que la tubería se desplazara lateralmente, lo que finalmente provocaría que el anclaje al ser tensado no transmitiera los esfuerzos de diseño al suelo. Dicha situación podría enmendarse, por ejemplo, tensando un poco más el anclaje, si este lo permite, teniendo en cuenta

el teorema de Pitágoras para calcular un esfuerzo igual al de diseño en el sentido perpendicular al muro de contención. Segundo, podría perderse la tubería pasante y no encontrarse a la hora de realizar la perforación. Por tanto, sería necesario buscar la manera de hacer una perforación limpia sin afectar el acero o consultar con el diseñador estructural si pueden afectar algunas barras de refuerzo en el proceso.

Se verifica también los empotramientos de las pilas y que estos sean consecuentes con los diseños. Lo anterior haciendo uso de cotas marcadas con topografía.

4.2.5 Metodología Tremie para vaciado de pilas manuales:

Las pilas fueron diseñadas para presentar una sola resistencia de concreto en toda su longitud, la cual es de 28 MPa lo cual es bastante común y muy conveniente para la parte constructiva ya que representa una dificultad menor a la combinación de concreto de múltiples resistencias en una pila. Este caso de múltiples resistencias fue el realizado en las pilas mecánicas implementadas en las torres del proyecto las cuales, como en las pilas manuales, también llevaron concreto Tremie. Retomando el muro de contención, para el vaciado, se tenía ya instalado el acero y los pases, en donde este primero debía estar colgando de unas manilas para asegurar el recubrimiento de diseño al no apoyar la canasta de refuerzo contra el suelo en la parte inferior de la pila. Posteriormente, se vierte el concreto y cuando la pila está por llenarse, se sueltan las amarras ya que el mismo concreto, en este punto, sostiene la canasta de acero.

La metodología Tremie es necesaria en este tipo de elementos estructurales debido a que, como se trató previamente, presenta un diseño de mezcla mucho más fluida que lo normal, en este caso contando con un asentamiento de diseño de 8 in, con inclusor de aire. Dicha metodología fue usada en las pilas de la siguiente manera:

1. Una vez ubicado el acero, se introducen tuberías hasta una profundidad de 11 cm aproximadamente más arriba del fondo de la perforación (sin tocar el fondo).
2. Teniendo la tubería instalada se conecta a una bomba estacionaria, la cual fue necesaria teniendo en cuenta que la superficie por donde ingresaban las mixers de concreto se encontraba varios metros por debajo en altitud de la boca de la perforación y no era posible por esto vaciar el concreto desde arriba por lo que la solución final fue bombearlo. Existen

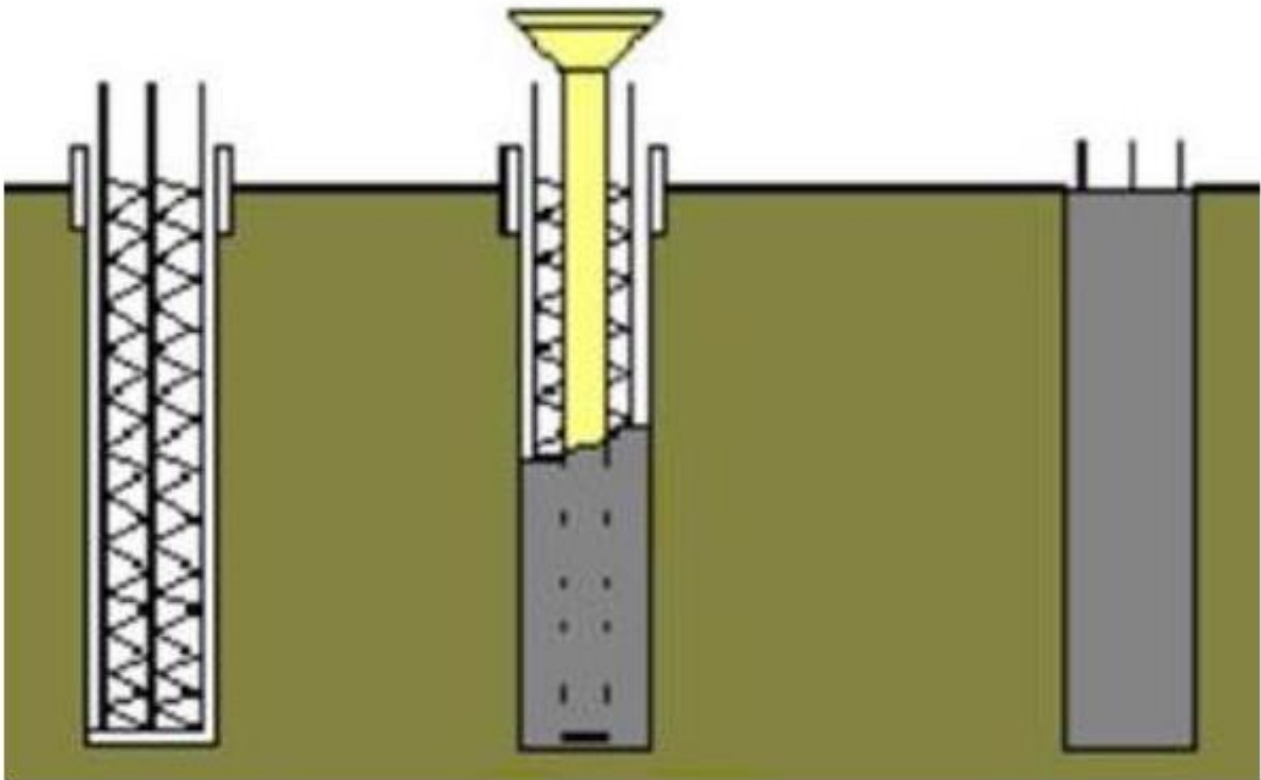
diferentes tipos de bombas estacionarias y en la mayoría de los casos deben ser contratadas con una empresa aparte a la proveedora del concreto. Dicho servicio suele contar con personal especializado en estos tipos de procedimientos

3. Posteriormente, se vaciaba el concreto y se iban retirando tubos de la profundidad de la perforación para que la mezcla fluyera más fácilmente. Lo anterior, cuidando que la tubería siempre estuviera sumergida y por debajo de la superficie del concreto vaciado evitando porosidades y segregación.

Se pueden entender de una mejor forma los pasos descritos anteriormente con la figura 12:

Figura 12

Ilustración de vaciado con metodología Tremie.



Nota. Tomado de: (Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI], 2021)

Algo que debe ser comentado es la variabilidad de la cantidad de concreto usado en cada pila y las diferencias con el volumen teórico necesario para cada una de ellas. Lo anterior debido a las múltiples desigualdades entre cada porción de suelo, los poros presentes y la inexactitud de las profundidades de excavación debido a la imposibilidad de llegar a valores exactos en un medio tan variable como lo es el suelo. Esta situación fue mucho más crítica en las pilas mecánicas usadas para la cimentación de las torres ya que no contaban con anillos de entibado y estaban en contacto directo con el suelo, sus porosidades y los posibles pequeños derrumbes.

4.2.6 Viga cabezal

La viga cabezal es un elemento diseñado para la unión de todas las pilas del muro de contención y hacerlas funcionar como una sola estructura. Esta, se construía en tramos a medida que se iban teniendo grupos de pilas contiguas vaciadas y listas. El proceso iniciaba con una excavación en el suelo a la altura de la parte más alta de cada pila. El encofrado se realizaba en madera, el posterior armado del acero de refuerzo y la unión de este con el del tramo de viga adyacente y con la canasta de refuerzo de cada pila se hacía por medio de los llamados “pelos” dejados para este propósito. El orden y los tramos construidos de dicha viga se muestran a continuación en la tabla 7. Además, se puede observar una fotografía de un tramo de viga cabezal sobre un conjunto de pilas en la figura 13.

Tabla 7

Secuencia de excavación de los tramos de la viga cabezal.

tramo	Pilas	Fecha
1	32-23	15-nov-21
2	17-24	23-nov-21
3	1-6	27-nov-21
4	7-9 y 17-15	14-nov-21
5	9-15	18-mar-21

Nota. Elaboración propia.

Figura 13

Tramo del muro de contención. Primer plano a viga cabezal.



Nota. Elaboración propia.

4.2.7 Recomendaciones Constructivas, medidas de seguridad y normativas

En este apartado se mostrarán algunas de las recomendaciones más importantes que fueron generadas por las empresas encargadas de los estudios de suelos y los diseños referentes al muro de contención. Todas o la mayoría de dichas recomendaciones pueden extrapolarse a cualquier proyecto o proceso constructivo similar y están fundadas principalmente en la seguridad y prevención de fallas antes, durante y después de la construcción.

Inicialmente, en cuanto a la caracterización de los suelos en la obra, como necesidad para generar hipótesis de diseño para las pilas del muro y para la estructura en general en términos de carga, nivel freático, tipo de suelo, entre otras cosas, fue necesario hacer un estudio exhaustivo en el cual la empresa contratada realizó 19 sondeos en campo con una profundidad de hasta 56m. Se puede ver la distribución de estos en la figura 14 extraída del estudio de suelos del proyecto:

Figura 14

Localización de sondeos para estudio de suelos.



Nota: Tomado de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)

Se realizaron también un total de quince perforaciones para toma de muestras y ensayo SPT, se extrajeron muestras inalteradas en tubos Shelby y alteradas de tipo cuchara partida. Sin embargo, y a pesar de la rigurosidad anteriormente descrita y extraída del estudio de suelos del proyecto, es de vital importancia revisar en la etapa constructiva la concordancia de los perfiles y características del suelo asumidas y las observadas. Lo anterior se manejó en el proyecto con bastante rigurosidad tanto para las excavaciones del muro de contención motivo de estudio en esta informe como para las concernientes a las pilas mecánicas que funcionarán como cimentación para las torres. Para estas últimas, se tuvo la responsabilidad de recolectar las muestras de suelo en cada una de las perforaciones y llevar un registro fotográfico de las mismas. Alguno de estos registros se muestran a continuación en la figura 15.

Figura 15

Muestras de suelos en excavaciones de pilas mecánicas. Pila 8, 67, 139 y 64 respectivamente.



Nota. La numeración indica la profundidad a la que se encontró cada muestra. Fuente: Elaboración propia.

Esta actividad también se llevó a cabo para las pilas manuales del muro de contención en una fase previa y obedeció a la recomendación directa de los ingenieros especialistas en geotécnica de verificar los perfiles y reportar dado el caso de que no hubiera coincidencia entre las muestras y el perfil de suelo esperado. De igual manera, el registro fotográfico fue enviado periódicamente para la revisión constante de los geotecnistas.

La observación anterior también hace referencia a la normativa colombiana sísmo resistente NSR-10 que exige el acompañamiento técnico de un ingeniero geotecnista en etapas constructivas para proyectos catalogados como categoría media, alta o especial que aprobará los procesos constructivos llevados a cabo en cimentaciones y contenciones (NSR-10. H.2.2.3).

Otra de las indicaciones más importantes es referente al nivel freático. Se debió estar atento a cualquier afloración del mismo e informarlo inmediatamente a los suelistas. Lo anterior, debido a que esta situación puede requerir estudios adicionales y puede significar discrepancias en la suposiciones asumidas para diseños y procedimientos.

Se considera además de gran importancia el paso descrito anteriormente en cuanto a la excavación de las pilas en forma discontinua y siempre dejando una pila sin excavar o ya vaciada de por medio entree dos excavaciones simultaneas. Lo anterior se llevó a cabalidad en la obra y acontinuación se muestra el orden de inicio de cada excavación.

Tabla 8
Orden de excavación de pilas

Pila excavada	Fecha de inicio
2	13-sep-21
4	13-sep-21
6	13-sep-21
8	13-sep-21
10	13-sep-21
14	15-sep-21
16	15-sep-21
18	15-sep-21
20	15-sep-21
12	15-sep-21
22	17-sep-21
24	17-sep-21
3	20-sep-21
26	20-sep-21
28	20-sep-21
30	20-sep-21
32	20-sep-21
19	20-sep-21

21	9-oct-21
23	9-oct-21
27	12-oct-21
25	13-oct-21
7	20-oct-21
29	20-oct-21
1	21-oct-21
31	21-oct-21
5	22-oct-21
9	27-oct-21
13	30-oct-21
15	31-oct-21
17	23-nov-21
11	23-nov-21
33	2-dic-21
34	15-ene-22
35	15-feb-22

Nota. Elaboración propia.

Como medida de prevención y medición con el objetivo de evitar movimientos excesivos o detectarlos rápidamente en el talud o deformaciones mayores a las permitidas en el muro de contención, se debieron instalar cinco inclinómetros sobre la viga cabezal del muro de contención puestos dentro de una tubería de PVC y asegurados con un tapón de prueba en la boca superior de la misma. Los mismos son medidos con un aparato electrónico de precisión milimétrica con una regularidad periodica de 20 días. En cada medición se envía un informe de las deformaciones presentadas respecto a dos ejes: uno perpendicular a la cara del muro y el otro a la dirección de las pilas. A continuación, en la figura 16 se puede observar uno de los inclinómetros sobre la viga cabezal.

Figura 16

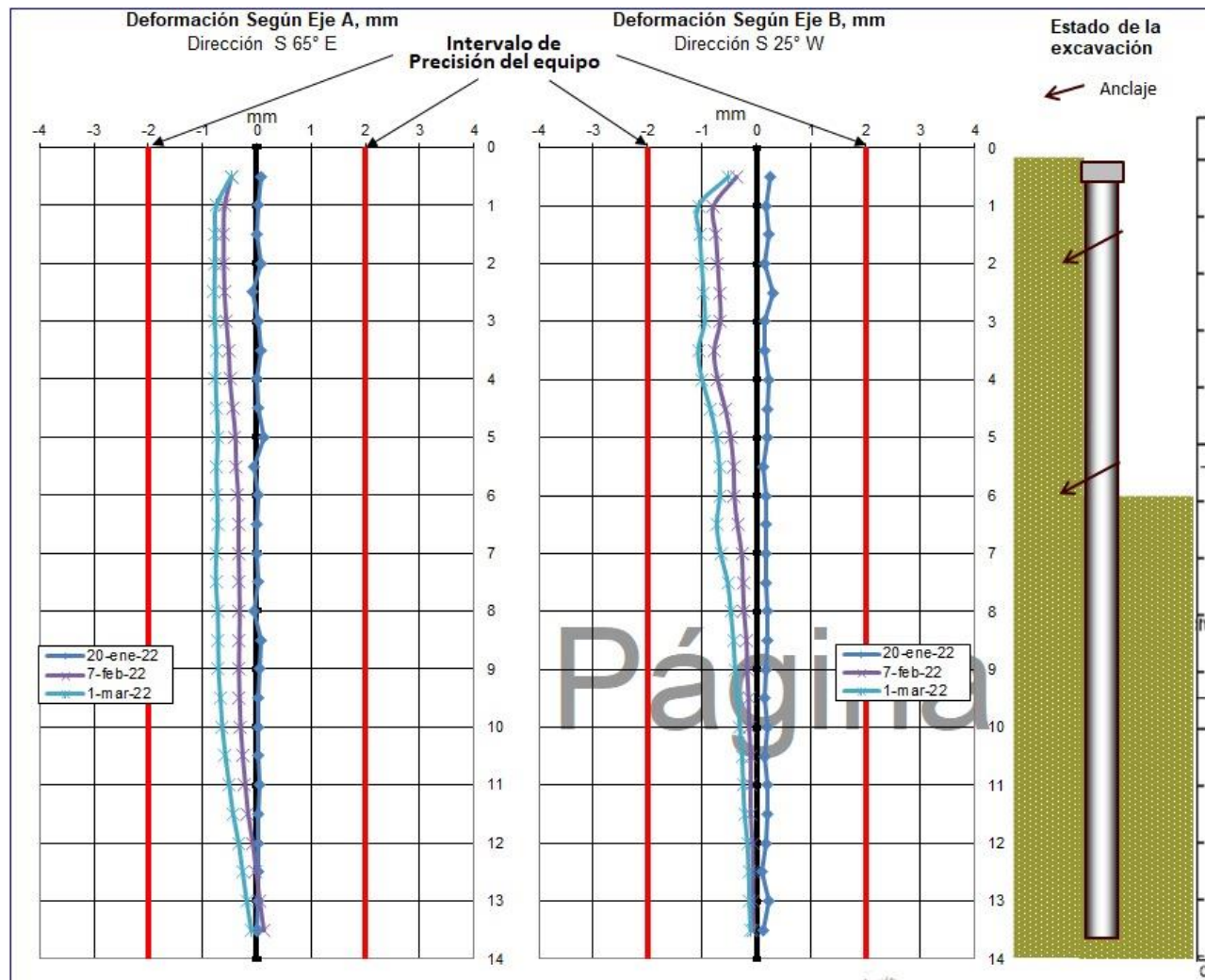
Fotografía de uno de los inclinómetros sobre la viga cabezal del muro de contención.



Nota. Elaboración propia.

El artefacto usado para la medición de las inclinaciones para cada inclinómetro contaba con un cable de gran longitud y una zona que se acoplaba a las paredes de la tubería midiendo cualquier desplazamiento del tubo en cualquier dirección, al mismo tiempo el operario de este veía en la pantalla la profundidad a la que iba midiendo y las deformaciones en tiempo real. Los informes realizados evidenciaban los movimientos de los puntos medidos inicialmente de referencia para cada profundidad en cada uno de los inclinómetros. La figura 17 ilustra uno de los dichos informes. Las deformaciones están en milímetros y la profundidad en metros.

Figura 17
Informe de deformaciones del inclinómetro 1.



Nota. Tomado de: (Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S., 2020)

4.2.8 Perforación para anclajes activos y drenes

En un tramo de muro puede empezarse a excavar y a desconfinar el suelo una vez las pilas de ese tramo estén vaciadas y su respectiva porción de viga cabezal también lo esté. Dicha excavación debió hacerse hasta una profundidad de entre 0.8m y 1m máximo medido desde el anclaje que vaya a empezarse a perforar y construir. Lo anterior, por dos razones principales: la primera obedece a las indicaciones de los diseñadores estructurales y los suelistas para no desconfinar las pilas un tramo importante sin haberlas anclado al suelo. La segunda obedece a temas operativos, es decir, de la maquinaria usada para realizar la perforación de los anclajes, ya

que esta no podrá posicionarse correctamente y realizar la perforación con la inclinación indicada si se excava más de lo antes mencionado, aunque también tendrá problemas para realizar sus labores si se excava mucho menos. Por lo tanto, fue de vital importancia ser preciso en las excavaciones de los tramos a anclar. Para los siguientes cortes durante el desconfinamiento del lado del muro que se excavará, el procedimiento de excavación no deberá realizarse hasta que los anclajes de esa línea estén instalados y tensados.

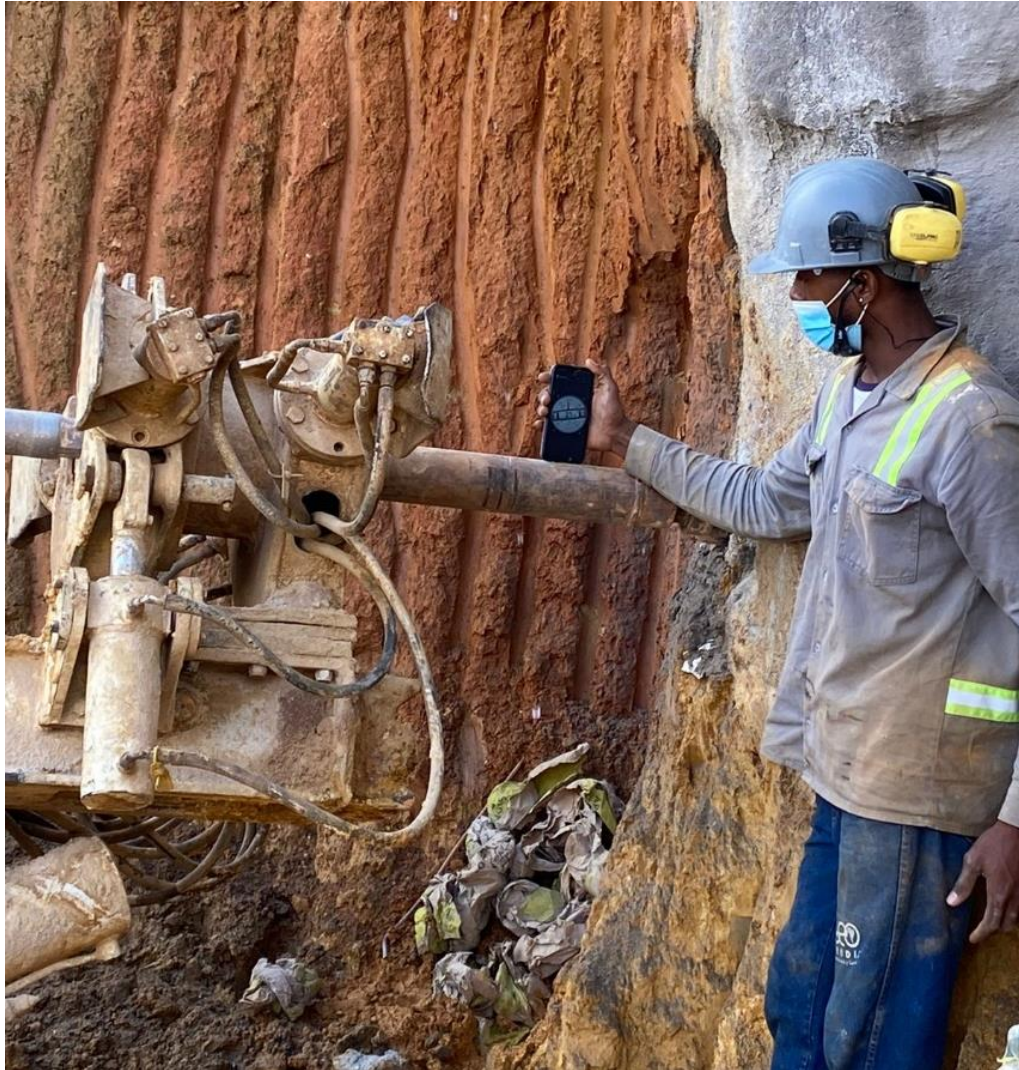
La maquinaria implementada tiene funcionamiento hidráulico, brocas removibles y especializadas para diferentes tipos de suelo. Además, está conectada a un compresor que funciona con ACPM como combustible y que otorga potencia a la máquina. Esta puede funcionar con percusión o rotación, las cuales son las dos formas aceptadas por los geotecnistas para la ejecución de las perforaciones. Sin embargo, se usó únicamente rotación durante la perforación tanto para los anclajes como para los drenes en la obra.

El procedimiento para la ubicación y posicionamiento de la maquina perforadora iniciaba con la ubicación de las brocas sobre el sistema hidráulico con el alineamiento de este mismo de una forma perpendicular a la dirección del muro. Cabe aclarar que entre las indicaciones técnicas recibidas se tenía la restricción de una desviación máxima de 30 mm por metro lineal de la perforación del anclaje.

Posteriormente, se verificaba la inclinación del anclaje respecto a la horizontal. Para cada uno de los anclajes de esta contención, este valor fue de 20 grados. La verificación se realizaba con herramientas de los dispositivos celulares de los ingenieros. Además, para cada una de estas verificaciones se debía estar en presencia del supervisor técnico de la obra, el ingeniero a cargo de los contratistas que realizaban la actividad y un representante del equipo de ingeniería de la obra. La actividad de verificación de la inclinación se puede observar en la figura 18.

Figura 18

Verificación de inclinación de anclajes.



Nota. Elaboración propia.

Una de las problemáticas más comunes durante la ejecución de los anclajes fue la de los constantes derrumbes sobre todo a profundidades altas. Dicho evento también coincidía en la mayoría de los casos con zonas dónde el nivel freático se presentaba muy rápidamente y con situaciones, en muchos casos, contraintuitivas, en las que, por ejemplo, se encontraba con una pila que al ser perforada a una altura específica brotaba agua en grandes cantidades y otra pila situada al lado perforada a la misma altura no presentaba inconvenientes ni brotaba agua en esas cantidades.

Adicionalmente, en caso de derrumbes internos durante la ejecución se procedía a tratar de limpiar la misma e intentar terminar la perforación. Sin embargo, si los derrumbes continuaban, se debía seguir las indicaciones presentadas por los geotecnistas. Los lineamientos eran realizar un llenado con lechada dentro de la perforación para cimentar sus paredes, permitir el secado de esta y finalmente volver a perforar. Lo anterior podía presentarse en repetidas ocasiones y el proceso debía repetirse. Así mismo está indicado en los documentos oficiales para la construcción del muro.

Una vez realizada la perforación, y teniendo en cuenta que la adherencia entre los anclajes y el suelo debe ser óptima, se debía limpiar la perforación para extraer todos los residuos y el suelo suelto que pueda afectar la unión posterior del anclaje con las paredes internas del orificio. Este proceso se realizó con la misma maquina perforadora y haciendo uso del compresor para inyectar aire a muy alta presión, lo que resultaba finalmente en una expulsión de residuos, agua y suelo. El posicionamiento de la máquina para perforar anclajes o drenes es casi análogo, solo varia en la inclinación (20 grados para anclajes y entre -5 grados y -8 grados para drenes). Dicho posicionamiento para la perforación de anclajes se puede ver en la figura 19.

Figura 19

Perforación para anclajes.



Nota. Elaboración propia.

Se realizaron además drenajes entre las pilas para evitar la acumulación de agua detrás del muro y alivianar las cargas sobre el mismo. Dichos drenes se construían en tres tramos de 5m cada uno y se unían antes de introducirlo a la perforación previamente realizada con la misma maquinaria que se usaba para los anclajes. La inclinación era en sentido inverso a la de los anclajes y se hacía entre 5° y 8°. Los tubos de PVC se perforaban y luego se recubrían con un geotextil no tejido NT 2500. El posicionamiento de la maquina perforadora para la realización de drenes se puede observar en la figura 20.

Además de estos drenajes, se debieron realizar cunetas en la parte superior del talud y contigua a la viga cabezal incluyendo labores de impermeabilización de dicha viga para el manejo del agua superficial.

Figura 20
Perforación para drenes.

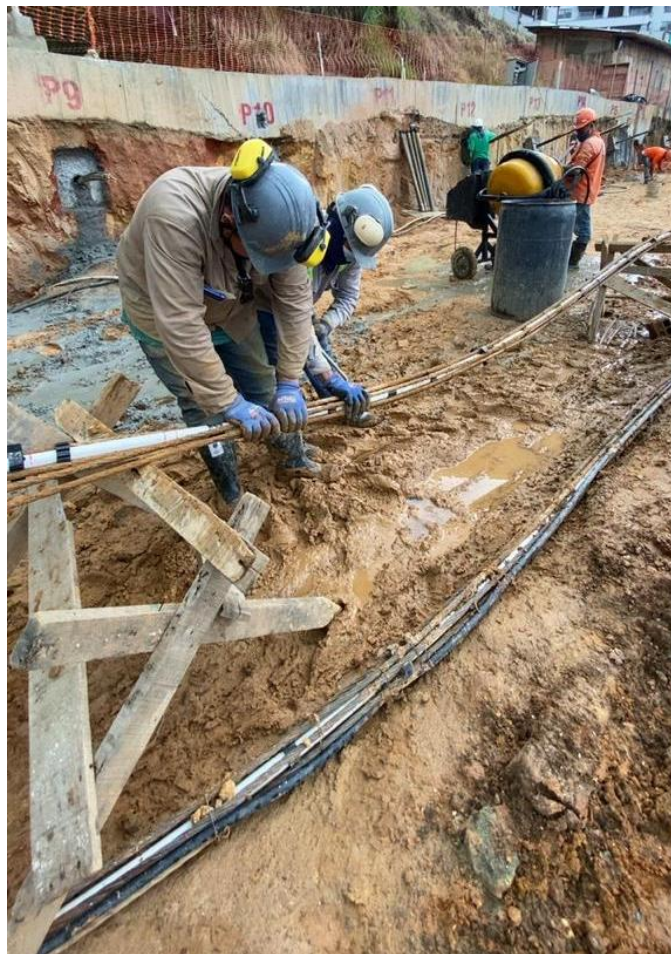


Nota. Elaboración propia.

4.2.9 Armado de tensores, llenado e inyección

El armado de los tensores es una actividad que requiere personal capacitado y tiempo. Así pues, se debe realizar en paralelo y con personal extra mientras se ejecutan las perforaciones para que una vez estas estén listas, se pueda continuar con el proceso constructivo sin retrasos. A continuación, en la figura 21 se puede observar el armado de dichos tensores mientras están puestos en los llamados “burros” de madera que los mantienen por encima del suelo. Es necesario acotar que antes de ser introducidos a la perforación, los tensores deben ser lavados muy bien para extraer toda la suciedad y lodo acumulados durante su armado y transporte. También, será útil la figura 27 como un esquema de las partes del anclaje mencionadas previamente.

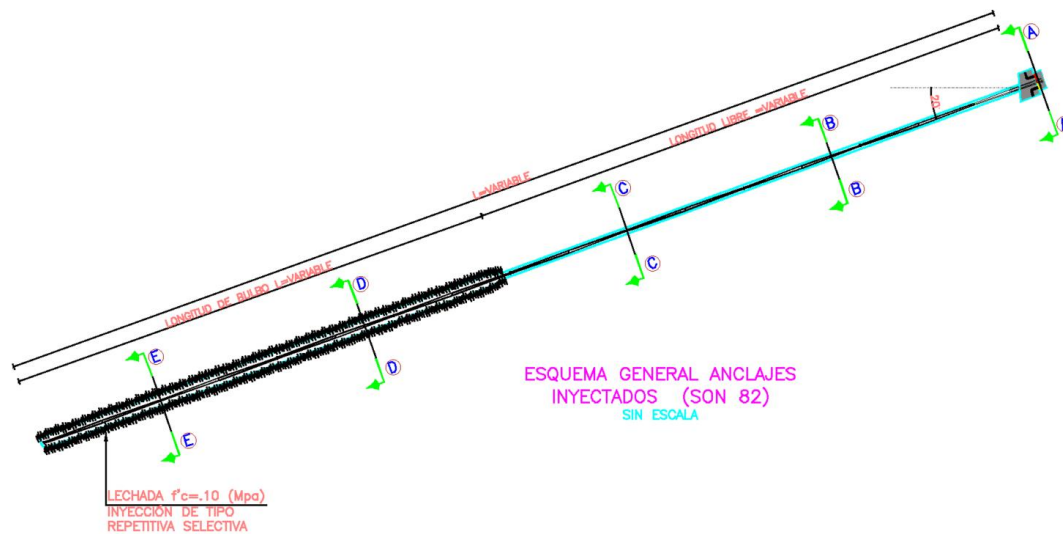
Figura 21
Armado de torones.



Nota. Elaboración propia.

Figura 22

Esquema del diseño de anclaje activo para el muro de contención de la obra.



Nota. Elaboración propia.

Se puede observar en la imagen anterior, al anclaje dividido en cortes desde el A-A hasta el E-E, en cada uno de estos se mostrará la composición del tensor que es parte fundamental del anclaje y su funcionalidad.

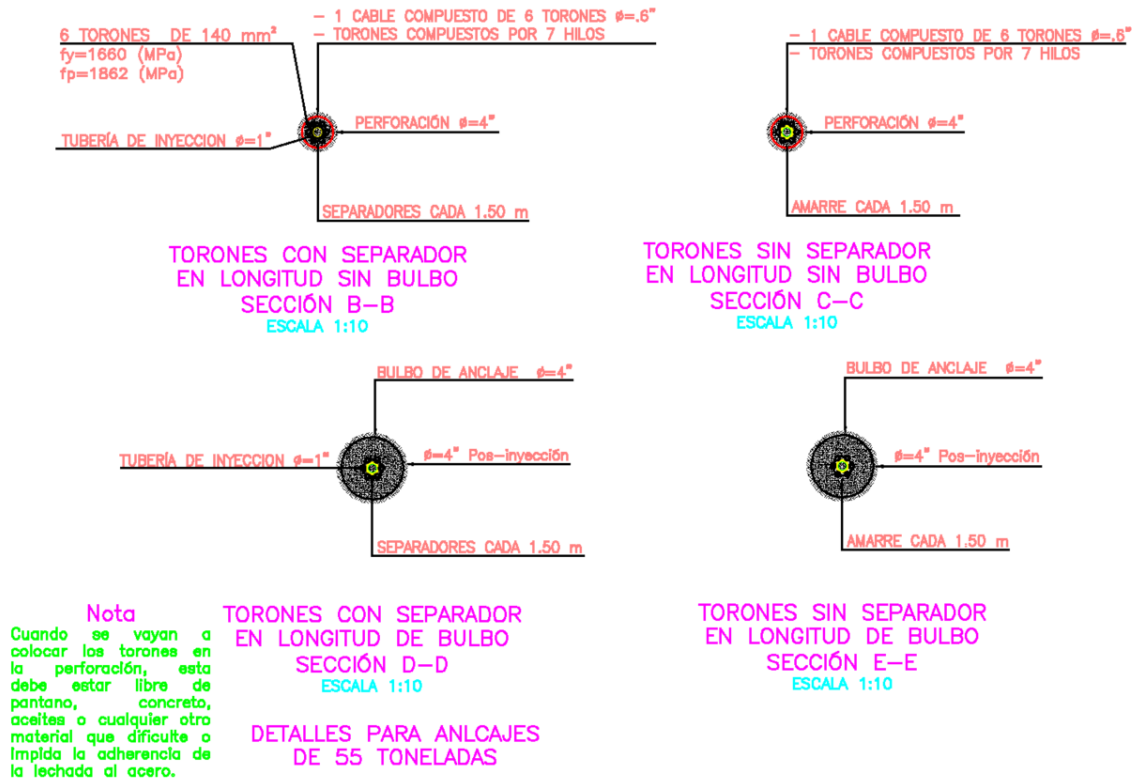
Inicialmente, se debe entender al tensor como el conjunto de torones dentro del anclaje. En este diseño, cada torón posee siete hilos de acero enrollados y cada tensor posee seis torones. Sin embargo, también existen otros componentes dentro del mismo.

Existen dos longitudes importantes de los tensores que se pueden ver en el esquema, la primera es la longitud libre (cortes B-B y C-C) y la segunda es el bulbo. Para la longitud libre, los torones van recubiertos por una manguera para evitar que la lechada se adhiera a ellos y así permitir, en esta zona, la elongación de los cables y el correcto tensionamiento. También. Por toda esta zona, se puede observar una tubería de inyección, por donde se ingresará la lechada al anclaje. Además, no solo en esta zona sino a lo largo de todo el tensor, se establecieron a una separación de 1.5 m los separadores encargados de separar los torones y de mantener el tensor en el medio de la perforación.

En la zona de Bulbo el acero queda expuesto y deberá ser protegido contra corrosión, sin embargo, es necesario que pueda estar en contacto con la lechada que va a inyectarse y se adhieran estos dos al suelo en profundidad. La figura 23 muestra un esquema de lo explicado anteriormente.

Figura 23

Esquema de detalles para cortes anclaje activo.



Nota. Elaboración propia.

Los tensores se introducen manualmente y deben quedar centrados dentro de la perforación, allí es donde entra en juego la utilidad de los separadores puestos a 1.5m de distancia entre sí.

Una vez introducido el tensor en la perforación se procede a realizar el proceso de inyección a flujo libre con lechada, para posteriormente realizar la inyección a presión en un periodo menor a 24 horas con una presión en este caso de 1.3Mpa y con un volumen igual a dos veces el teórico para generar un bulbo resistente en profundidad. Si no se alcanza dicha presión, se realizará la inyección de nuevo al día siguiente.

La lechada tiene una resistencia definida y como cualquier elemento estructural, se envía a fallar al laboratorio para verificar su resistencia. Esta es necesaria para la aprobación de la realización de los tensionamientos de los anclajes.

4.2.10 Construcción de dados, tensionamiento y pruebas de carga

Una vez inyectados los anclajes y aprobadas las resistencias de las lechadas, se procede a construir las formaletas para el vaciado de los dados. Dichos dados deben cumplir con varias condiciones específicas y son las siguientes:

Una vez inyectados los anclajes y aprobadas las resistencias de las lechadas, se procede a construir las formaletas para el vaciado de los dados. Dichos dados deben cumplir con varias condiciones específicas y son las siguientes:

- Los dados se ven sometidos a presiones desde el momento de tensionar los anclajes hasta el final de su vida útil por lo que deberán cumplir con los diseños en cuanto al refuerzo, lo cual es necesario revisar y corregir constantemente en obra. Esto además de la resistencia del concreto que en este caso es de 21MPa pero que por cuestiones de seguridad al hacer la mezcla en obra por medio de una mezcladora y no tener todos los aspectos a favor en dicho proceso, se realizaba de 41MPa.

- La cara principal o frente de los dados debía estar inclinada y estar completamente perpendicular al tensor saliente de la perforación. Lo anterior para que, al realizar el tensionamiento, el dado no se viera expuesto a esfuerzos adicionales para los que no fue diseñado y este no falle. Además de evitar el roce nocivo de los torones con el concreto y producir en ellos un deterioro.

- Al ser elementos relativamente pequeños y requerir una cantidad de concreto baja, pueden llenarse con concretos sobrantes pedidos con resistencias iguales o mayores a la exigida por diseño (3000psi). Esto como sucedió en obra cuando se estaban vaciando las pilas mecánicas

para las cimentaciones de las torres y era factible usar el concreto que quedaba en las *mixers*³ para esta actividad ya que además de sobrepasar la resistencia de diseño, contaba con una calidad mucho mejor que el preparado en obra.

- El acero debía estar bien adherido a la pila antes de fundir el dado y esto requería una distancia mínima empotrada sobre el concreto exterior de la pila, además de un buen canchado y uso del epóxico de forma generosa sobre el acero a introducir.

Una vez fundido el dado, se mandan a fallar cilindros como lo expresa la norma colombiana sismorresistente NSR-10 para, si las resistencias son satisfactorias, se procede a realizar el tensionamiento de los anclajes con un gato hidráulico como se muestra en la figura 24.

Figura 24
Tensionamiento de anclajes.



³ Son vehículos diseñados para el transporte de concreto premezclado desde las plantas de empresas especializadas en fabricación de mezcla hacia la obra.

Nota. Elaboración propia.

Al tiempo que se ejecuta el tensionamiento, se cuenta con un equipo que mide en tiempo real la carga aplicada a tensión y la deformación sufrida por el tensor.

La prueba de tensionamiento se hace por cada anclaje o grupo de anclaje mínimo tres días después de haber realizado el proceso de tensionamiento y, según las indicaciones dadas por los diseñadores, el tensor deberá estar sometido a un esfuerzo mayor al 95% de la carga máxima de trabajo y si no lo está, deberá volverse a tensionar y realizar de nuevo la verificación. Posteriormente, y habiendo realizado los procesos anteriores de forma satisfactoria en una línea de anclajes en una zona, se podía excavar una vez más entre 0.8 m y 1 m de profundidad desde la siguiente línea de anclajes hacia abajo. Dicho movimiento y zonas se veían como en la figura 25. Así, en ciertas partes iban quedando cuñas en zonas donde se habían presentado problemas o retrasos, pero podía continuarse el proceso constructivo en otras zonas.

Figura 25

Movimiento de tierra en área contigua al muro.



Nota. Elaboración propia.

4.2.11 Actividades de emporado y champeado del muro

Como se ha mostrado en este informe, el muro de contención se diseñó a partir de un grupo de pilas separado una distancia de 2.8 m y anclado sobre dichas pilas. Así, al realizar los procesos anteriores e ir excavando, quedaban unos espacios en suelo que, además de no ser adecuados estéticamente, significaban posibles derrumbes parciales y múltiples problemáticas que podrían ocurrir a futuro con la contención. Lo anterior, se subsanó con la actividad de **champeado** y **emporado**. Dichas actividades consistieron en inicialmente colocar una malla electrosoldada en estas porciones desprotegidas de suelo para luego cubrirlas con un mortero con un espesor de 10cm. Sin embargo, antes de realizar este proceso, se debía ejecutar una limpieza del suelo pegado a las pilas y el espacio entre estas para dejar lisas las y libres de suelo a estas zonas. Esto se realizaba inicialmente con la ayuda de una pajarita y luego, para no excavar de más sobre estos muros, se asignaba a uno o más ayudantes equipados con herramientas manuales como cinceles además de andamios. Por lo tanto, el termino emporado obedece a la actividad antes descrita realizada específicamente sobre las pilas mientras que el champeado obedece a la realizada en el espacio entre pilas.

En la figura 26 se pueden observar las pilas de la izquierda después de haber sido limpiadas por maquinaria pesada y las de la derecha, en donde están ubicados los ayudantes, ya se les ha quitado la totalidad del suelo sobrante a mano y están listas para el emporado. La misma situación sucede con el champeado en la zona entre pilas. Dichos procesos ya realizados se pueden ver en la misma imagen en la zona superior del muro.

Figura 26

Proceso de limpieza, emporado y champeado de pilas.



Nota. Elaboración propia.

5 Conclusiones

Proceso Constructivo:

- Es necesario, en lugares con altas precipitaciones como el sur del valle de Aburrá la planeación de cunetas o drenajes provisionales para los cortes temporales de tierra en el área contigua a los anclajes que permitan evacuar el agua que fácilmente se represa y lleva al suelo fino superficial a puntos más allá del límite líquido generando grandes zonas de fluidos lodosos que dificultan y retrasan la entrada de la maquina perforadora y el personal.
- La planeación previa de zonas de acopio de material como agregado o torones, mangueras y separadores para los tensores de los anclajes es vital para la optimización de tiempo en la obra y la disminución de horas extras trabajadas por el personal operativo, ya que es una constante la cantidad de veces que se deben transportar dichos materiales a medida que la obra, que es cambiante, va avanzando y a medida que se van realizando cortes nuevos.
- El control de lluvias horario permite un análisis detallado de cómo afectan las precipitaciones a la operación de la obra y facilita la toma de decisiones. Además, podría plantearse la implementación de pluviómetros artesanales a lo largo de la obra para obtener valores de cantidad de agua llovida en la obra y tomar decisiones a partir de dichos datos.
- Las bombas manuales son significativamente más eficientes para la evacuación del agua durante el proceso constructivo de las pilas manuales ya que evitan la constante falla de los flotadores que activan a las bombas automáticas. Además, evitan el riesgo de retrasos en la obra al disminuir la posibilidad de que se quemen las mismas.
- La limpieza de suelo sobrante previo a las labores de emporado y champeado debe realizarse mediante la combinación de esfuerzos entre personal y maquinaria pesada ya que de otra forma pueden tomar un exceso de tiempo usando solo ayudantes y si se emplea únicamente maquinaria, es seguro que se excava de más y ocasiona desde pequeños derrumbes locales hasta daños mayores en el champeado realizado o los drenes.

-

Proceso de diseño:

- Si bien los procesos constructivos están indicados y recomendados desde el proceso de planeación y diseño, es difícil contar con situaciones completamente ideales en obra, por lo que siempre habrá variaciones imprevistas que de igual manera deben ser consultadas y resarcidas en consenso con los equipos de diseño y construcción.
- Si bien es posible acercarse mucho a la realidad con estudios de suelo exhaustivos, siempre van a encontrarse diferencias en los estratos de suelo y en algunas condiciones asumidas mediante ensayos previos, por lo que es vital seguir la norma colombiana sismorresistente NSR-10 teniendo contacto frecuente con los equipos de diseño y geotecnia.
- Si bien las labores constructivas exigen un trabajo más procedimental, es de gran ayuda tener presentes los conocimientos técnicos y las suposiciones empleadas para el diseño, pero más aun entender cada una de estas para tenerlas presente a la hora de tomar decisiones en obra.
-

Otras conclusiones:

- Si bien no es tema de este informe, se hace más que evidente la influencia del ambiente de trabajo, la motivación y el trato a los trabajadores en que el personal operativo tenga mejor o peor rendimiento. Sería positiva una investigación enfocada en la influencia de este tipo de aspectos en la productividad de una obra o específicamente de cada proceso constructivo. El liderazgo y la productividad que este genera se hace evidente cuando los buenos lideres toman la vocería.
- Las metodologías ágiles implementadas principalmente en ambientes laborales enfocados en la tecnología pueden ser completamente extrapolables y generar una mejora en la planeación y la productividad de los procesos de una obra. De esa forma, reducir las relaciones jerarquizadas y promover el trabajo en equipo como fortaleza principal durante la ejecución de los diferentes procesos puede conducir a optimización de recursos y dinero y mejorar el ambiente laboral.

Referencias

- Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica.
- Clayton, C. R. I., Milititsky, J., & Woods, R. I. (1993). *Earth pressure and earth-retaining structures* (2nd ed.). London: CRC Press.
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México, D.F.: Learning Editores, S.A. de C.V.
- Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras. (2001). *Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera*. Madrid, España.
- Mattos, Á. J. (2019). Análisis por confiabilidad de pantallas de pilas en. *Repositorio institucional Universidad de Antioquia*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10495/18235>
- Soluciones Integrales en Proyectos de Construcción [SIPI]. (2021). *Informe muro longitudinal con pantalla de pilas y anclajes Proyecto Nido*. Sabaneta: Documento privado preparado para Centro Sur S.A.
- Toro Betancur, N. C. (2017). ASPECTOS CONSTRUCTIVOS E INTEGRIDAD DE CIMENTACIONES PROFUNDAS. *Respositorio Institucional Univer5sidad de Antioquia*.
- Vieco Ingeniería De Suelos S.A.S. (2020). *Estudio de Suelos, Excavación y Contención proyecto Nido*. Sabaneta: documento privado preparado para Centro Sur S.A.