UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Análisis de diseño y construcción de pilas ancladas a roca en el proyecto Belo Horizonte, Torre 2: evaluación del proceso constructivo y justificación técnica de una solución de cimentación profunda en condiciones geotécnicas complejas.

Elizabeth Alejandra Aguirre Vergara

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Civil

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Asesor

Carlos Alberto Vega Posada, Doctor (PhD) en Ingeniería Civil

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803

Cita	(Aguirre Vergara, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Aguirre Vergara, E. A. (2025). A*nálisis de diseño y construcción de pilas ancladas a roca en el proyecto Belo Horizonte, Torre 2: evaluación del proceso constructivo y justificación técnica de una solución de cimentación profunda en condiciones geotécnicas complejas.* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

creative commons CC BY NC SA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

A mi mamá, quien con cada costura y cada hilada iba tejiendo mi futuro.
Hoy este logro no me pertenece solo a mí:
Es nuestro, porque en cada página están sus huellas invisibles.
Porque fueron sus manos las que me sostuvieron todo el tiempo.

A mi Titón, a quien me enseñó a agradecer el peso del tiempo, lo vivido, lo perdido, lo amado, lo que se sigue llevando dentro.

En memoria:

A mi amiga, Sofia, cuya sonrisa sigue acompañando este camino.

Agradecimientos

A mi familia, por ser raíz y aliento.
por enseñarme que la verdadera fuerza no nace solo del esfuerzo,
sino del amor que sostiene y acompaña en silencio.
A mis amigos, por ser compañía y refugio en los días de cansancio,
y por recordarme siempre que los logros compartidos tienen más sentido.
A la Universidad de Antioquia, por enseñarme que el conocimiento no es un fin, sino un camino para servir con propósito.
A FCR SAS y al equipo de trabajo de la obra Belo Horizonte, por mostrarme que el esfuerzo individual solo se engrandece en el colectivo, y que cada gesto compartido contribuye a levantar no solo estructuras, sino confianza y aprendizaje.

ANÁLISIS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PILAS ANCLADAS A ROCA EN EL PROYECTO BELO HORIZONTE, TORRE 2: EVALUACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DE UNA SOLUCIÓN DE CIMENTACIÓN PROFUNDA EN CONDICIONES GEOTÉCNICAS COMPLEJAS.

Tabla de contenido

Resumen 11

Abstract 12

1. Introducción 13

2. Objetivos 14

2.1 Objetivo general 14

3. Marco teórico 15

3.1 Proyecto Belo Horizonte 15

3.2 Cimentaciones profundas 15

3.2.1 Tipos de cimentaciones profundas 16

3.2.1.1 Pilotes 16

3.2.1.2 Pilas o caissons 16

3.2.1.3 Micropilotes 16

3.3 Pilas ancladas a roca 17

3.4 Sistema de anclaje con adhesivos epóxicos estructurales 17

3.5 Norma aplicable 18

3.6 Estudio geotécnico 19

4. Metodología 20

5. Análisis de resultados 22

5.1 Descripción general de la obra 22

5.2 Condiciones geotécnicas 22

5.3 Diseño de pilas inicial 27

5.4 Pilas ancladas a roca 32

5.4.1 Contexto del hallazgo en obra 32

5.4.2 Proceso constructivo de las pilas ancladas....36

5.4.2.1 Marcación y replanteo de pilas....36

5.4.2.2 Excavación y vaciado de pilas: mecánica y manual....36

5.4.2.3 Perforación y anclaje a roca....40

5.4.4 Comprobación de capacidad de anclajes a roca mediante tracción estática (ASTM E488)....47

6. Conclusiones y recomendaciones....49

Referencias....51

Anexos....53

Anexo 1. Póster. 53

Lista de tablas

Tabla 1 Esquema de meteorización de un macizo rocoso. Deere y Patton, 1971. 24

Tabla 2 Cuadro de anclajes 35

Lista de figuras

Figura 1 Perfil de meteorización de rocas metamórficas e ígneas intrusivas (Deere & Patton, 1971).....23

Figura 2 Modelo geotécnico local.....25

Figura 3 Modelo de cimentación de pilas pre-excavadas Torre 2. Módulos de reacción.....26

Figura 4 Pilas de cimentación.....28

Figura 5 Convenciones de pilas de cimentación.....29

Figura 6 Pilas de cimentación (del eje 1A al 12E).....29

Figura 7 Pilas de cimentación (del eje 1E al 12M).....30

Figura 8 Pilas de cimentación (del eje 1M al 12T).....30

Figura 9 Pilas de cimentación (del eje 13A al 23E).....31

Figura 10 Pilas de cimentación (del eje 13E al 23M).....31

Figura 11 Pilas de cimentación (del eje 13M al 23T).....32

Figura 12 Perforación de la roca en la pila.....33

Figura 13 Planta localización de pilas a tracción.....34

Figura 14 Detalle de anclaje a la roca.....35

Figura 15 Ilustración de vaciado con metodología Tremie.....37

Figura 16 Perforación, instalación de refuerzo y vaciado de concreto.....37

Figura 17 Excavación manual de pilas.....38

Figura 18 Anillado de entibación en excavación de pila.....39

Figura 19 Extracción de material con molinete.....40

Figura 20 Sistema de anclaje epóxico Hilti HIT-RE 500.....41

Figura 21 Instrucciones para la instalación del sistema HIT-RE 500.....44

Figura 22 Barras de refuerzo ancladas a la roca mediante el adhesivo epóxico HIT-RE 500.....44

Figura 23 Ensayo de tracción estática en anclajes 45

Figura 24 Vaciado de concreto de pilas por método Tremie 46

Figura 25 Pila anclada a roca vaciada 46

Figura 26 Ensayos de tracción estática en anclajes.....48

Figura 27 Póster 53

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Grados centígrados
Df	Profundidad de cimentación
kN/m³	KiloNewtons/metros cúbicos
KPa	Kilopascales
m	Metros
mm	Milímetros
MN	MegaNewtons
ms.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
MPa	Megapascales
NSR-10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente
SPT	Standard Penetration Test (Ensayo de Penetración Estándar)
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

El presente trabajo aborda el análisis, diseño y ejecución de pilas ancladas a roca en la cimentación de la Torre 2 del proyecto Belo Horizonte, en un contexto geotécnico complejo caracterizado por la aparición de macizo rocoso a profundidades menores a las previstas en los estudios iniciales. Esta condición obligó a replantear la solución constructiva, pasando de pilas convencionales a pilas ancladas, con el fin de garantizar la capacidad de soporte y la estabilidad estructural frente a cargas de tracción, levantamiento y esfuerzos horizontales.

El proceso constructivo incluyó excavación manual y mecánica de pilas, perforación del macizo rocoso y fijación de barras de acero con adhesivo epóxico estructural Hilti HIT-RE 500 V3, siguiendo estrictamente las especificaciones del fabricante y las normas internacionales (NSR-10, ASTM E488). Posteriormente, se procedió con la instalación del refuerzo y el vaciado del concreto mediante el método Tremie, asegurando la integridad estructural de la cimentación.

Se realizaron pruebas de tracción según la norma ASTM E488 en anclajes seleccionados, bajo la supervisión técnica y de interventoría, confirmando que los anclajes cumplían con los criterios de desempeño y garantizando la confiabilidad de la solución adoptada. Los resultados evidenciaron que la solución implementada respondió satisfactoriamente a las condiciones geotécnicas imprevistas, consolidando el anclaje en roca como una alternativa viable y segura en cimentaciones profundas y, demostrando que el mecanismo de transferencia de carga roca–concreto fue eficaz.

*Palabras clave***:** Pilas ancladas, cimentaciones profundas, anclaje a roca, Hilti HIT-RE 500, ASTM E488, NSR-10.

Abstract

This study presents the analysis, design, and execution of rock-anchored piles for the foundation of Tower 2 of the Belo Horizonte project, within a complex geotechnical context characterized by the presence of bedrock at shallower depths than initially anticipated. This condition required a redesign of the foundation solution, shifting from conventional piles to rock-anchored piles to ensure bearing capacity and structural stability against tensile forces, uplift, and horizontal loads.

The construction process involved manual and mechanical excavation of piles, drilling into the rock mass, and the installation of steel bars bonded with Hilti HIT-RE 500 V3 structural epoxy adhesive, strictly following the manufacturer's specifications and international standards (NSR-10, ASTM E488). Subsequently, reinforcement was installed and concrete was placed using the Tremie method, guaranteeing the structural integrity of the foundation.

Tensile load tests were performed in selected anchors according to ASTM E488, under technical supervision and inspection, confirming that the anchors met the performance criteria and ensuring the reliability of the adopted solution. The results demonstrated that the implemented approach successfully addressed the unforeseen geotechnical conditions, consolidating rock anchorage as a safe and effective alternative for deep foundations and proving the efficiency of the rock–concrete load transfer mechanism.

*Keywords***:** Rock-anchored piles, deep foundations, rock anchorage, Hilti HIT-RE 500, ASTM E488, NSR-10.

1. Introducción

La cimentación de una estructura es uno de los aspectos más críticos en el desarrollo de un proyecto de construcción, especialmente cuando se trata de edificaciones de grandes magnitudes y ubicadas en terrenos con condiciones geotécnicas complejas. El proyecto Belo Horizonte Torre 2, localizado en el municipio de Bello, Antioquia, presenta un caso particular de estudio, dado que su cimentación se resuelve mediante pilas ancladas a roca, una solución técnica que garantiza la estabilidad y seguridad de la edificación frente a las exigencias estructurales. El uso de pilas ancladas representa una alternativa eficiente dentro del grupo de cimentaciones profundas, especialmente en suelos con baja capacidad portante en las capas superficiales, donde es necesario transferir las cargas hasta un estrato resistente como lo es la roca. Este tipo de solución no solo responde a los retos del terreno y sus limitaciones, sino que, también responde a las necesidades propias del diseño estructural del edificio, cuyo peso, sistema constructivo y configuración requieren una cimentación que asegure el control de asentamientos, de resistencia al volcamiento, de estabilidad y de un adecuado comportamiento frente a un evento sísmico. Este trabajo busca analizar en detalle el diseño y la ejecución de las pilas ancladas utilizadas en la Torre 2 del proyecto Belo Horizonte, considerando tanto los criterios técnicos y normativos empleados, como las condiciones reales de la obra. A través del estudio de planos, documentos técnicos, informes de suelos y la experiencia observada directamente en obra, se busca comprender el porqué de la elección de este sistema de cimentación y evaluar su eficacia en el caso particular del proyecto.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar el diseño y el proceso constructivo de pilas ancladas sobre roca en la Torre 2 del proyecto Belo Horizonte, enfocándose en la transferencia de cargas a un estrato de suelo con mayor resistencia y en su efectividad como solución de cimentación en condiciones geotécnicas específicas.

2.2 Objetivos específicos

- Describir las condiciones geotécnicas y estructurales que justifican el uso de pilas ancladas sobre roca.
- Identificar los criterios técnicos empleados para el diseño de las pilas.
- Analizar los planos, memorias de cálculo y criterios técnicos que justifican el uso de pilas ancladas en el proyecto.
- Analizar el procedimiento constructivo implementado en la obra.
- Documentar, mediante registro fotográfico y observación directa, el proceso constructivo de las pilas ancladas.

3. Marco teórico

3.1 Proyecto Belo Horizonte

El proyecto se desarrolla en el municipio de Bello, Antioquia, y contempla la construcción de una unidad residencial compuesto por 3 torres de apartamentos, cada torre tiene una altura de 30 pisos, y 1 torre adicional de 8 pisos, destinada exclusivamente a parqueaderos. Además, el conjunto contará con diversas zonas comunes como, salón social, gimnasio, piscina, zonas verdes, etc., pensadas para el bienestar y la recreación de los residentes. El sistema constructivo utilizado en este proyecto es monolítico, lo que significa que los elementos estructurales como columnas, vigas, losas y muros se vacían de manera continua y conjunta en sitio, formando un solo cuerpo estructural de concreto. Este tipo de construcción busca una mayor integración entre los elementos de la edificación, generando una estructura más rígida y con mejor comportamiento ante cargas verticales y horizontales, como las producidas por sismos.

3.2 Cimentaciones profundas

Las cimentaciones son el conjunto de elementos estructurales que se encargan de transmitir las cargas de una edificación al suelo de forma segura y estable. Dependiendo de las condiciones geotécnicas del terreno, de la magnitud de las cargas estructurales y del tipo de obra, las cimentaciones pueden clasificarse en superficiales o profundas.

Las cimentaciones profundas se utilizan cuando los estratos superficiales del terreno no poseen la capacidad portante adecuada, o cuando se requiere alcanzar un estrato más competente a mayores profundidades para garantizar la estabilidad de la estructura. Según Bowles (1997), una cimentación profunda es aquella cuya profundidad es considerablemente mayor que su ancho, generalmente mayor a tres veces su dimensión transversal. Estas cimentaciones permiten transmitir las cargas por fricción lateral (por fuste), por apoyo directo en base (por punta) o por una combinación de ambas. Además, tienen un comportamiento relevante ante cargas axiales de compresión o tracción, y laterales de viento, sismo, empuje de tierras.

3.2.1 Tipos de cimentaciones profundas

3.2.1.1 Pilotes

Los pilotes son elementos estructurales delgados y esbeltos, que se introducen en el terreno mediante hincado, perforación o inyección, y que trabajan transmitiendo las cargas estructurales a estratos profundos del suelo. Pueden ser de concreto, acero o madera, y su uso es común en suelos blandos o compresibles.

Según Tomlinson y Woodward (2015), los pilotes pueden clasificarse en:

Pilotes de fricción o por fuste: Transmiten la carga principalmente a través de la fricción entre la superficie del fuste del pilote y el suelo circundante.

Pilotes de punta o de carga final: Transfieren la carga directamente al estrato firme sobre el que se apoyan.

Pilotes combinados: Usan ambos mecanismos de resistencia: fricción y punta.

3.2.1.2 Pilas o caissons

Las pilas o caissons son elementos de gran diámetro, construidos por excavación y vaciado in situ de concreto. A diferencia de los pilotes, permiten inspección directa durante su construcción. Se usan comúnmente en estructuras de gran tamaño, puentes, edificios en altura y cimentaciones sometidas a grandes cargas. Según Coduto (2001), las pilas pueden alcanzar diámetros superiores a los 1.20 m y profundidades considerables, lo cual las hace adecuadas para condiciones geotécnicas complejas.

3.2.1.3 Micropilotes

Los micropilotes son pilotes de pequeño diámetro (generalmente entre 100 y 300 mm), instalados mediante perforación e inyección de lechadas de cemento o mortero. So n útiles en espacios reducidos o para el refuerzo de cimentaciones existentes. Según FHWA (2005), se caracterizan por su alta capacidad específica y su adaptabilidad a terrenos difíciles.

3.3 Pilas ancladas a roca

Las pilas ancladas a roca son un tipo de cimentación profunda en la que los elementos estructurales verticales se extienden hasta un estrato rocoso competente, y se anclan mediante adherencia mecánica o química a dicho estrato para mejorar la capacidad de carga, reducir el asentamiento y, especialmente, resistir cargas de tracción o esfuerzos sísmicos.

Este tipo de solución se aplica en edificaciones con altas cargas verticales o solicitaciones laterales importantes, como torres de gran altura, puentes o taludes. La principal ventaja es el trabajo conjunto entre la pila y el macizo rocoso, generando un sistema de empotramiento eficiente.

El anclaje a roca puede realizarse por distintos métodos, entre ellos:

Empotramiento por fricción: la pila se prolonga dentro del macizo rocoso con suficiente longitud de fuste, de modo que el rozamiento lateral provea el anclaje.

Anclaje activo o pasivo con barras o cables de acero: se instalan elementos metálicos dentro de perforaciones en la roca, fijados con morteros cementicios o resinas epóxicas, y que permiten transferir la carga directamente a la roca.

Según Grindheim et al. (2022), estos anclajes pueden fallar por diversos mecanismos, desde ruptura del acero hasta falla del macizo rocoso, lo que resalta la necesidad de asegurar una adecuada calidad de apriete del adhesivo. Además, en condiciones de carga cíclica, la capacidad de anclaje tiende a degradarse progresivamente, lo cual debe tenerse en cuenta en zonas sísmicas o con cargas repetitivas.

Las principales ventajas de las pilas ancladas a roca incluyen una mayor capacidad portante, menor longitud de excavación en comparación con otros tipos de pilas, y un mejor comportamiento ante cargas sísmicas debido a la rigidez del empotramiento (Coduto et al., 2016). Además, al estar insertas en un medio geológicamente estable, presentan menor susceptibilidad a asentamientos diferenciales y deformaciones excesivas.

3.4 Sistema de anclaje con adhesivos epóxicos estructurales

En el caso de este proyecto, se utilizó un sistema de barras ancladas con adhesivo Hilti HIT-RE 500 V3, una resina epóxica viniléster bicomponente con alta resistencia al corte (>15 MPa), baja retracción, buena adherencia y certificaciones internacionales para uso en roca fisurada o no

fisurada (ETA-16/0142, ICC-ES ESR-3814), adecuada para fijaciones estructurales críticas en concreto o roca (Hilti, 2020). Este producto garantiza altos valores de adherencia, buena trabajabilidad y durabilidad, incluso en condiciones húmedas.

El proceso constructivo incluye la perforación del fondo de la pila hasta la roca, limpieza del hueco, instalación de las barras de acero corrugado, e inyección del adhesivo Hilti HIT-RE 500 asegurando un contacto completo y homogéneo. Este tipo de anclaje no solo permite una conexión sólida y confiable entre la pila y la roca, sino que también mejora la rigidez local del sistema de cimentación, reduce el riesgo de deslizamiento y optimiza la transferencia de carga bajo esfuerzos combinados (Hilti, 2021).

3.5 Norma aplicable

El diseño y la construcción de cimentaciones en Colombia se rigen principalmente por la **Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente** (**NSR-10**), particularmente el Título H – Cimentaciones, el cual establece criterios para cimentaciones profundas, resistencia a compresión y tracción, requisitos geotécnicos, control de calidad y procedimientos constructivos.

A nivel internacional, se recomienda complementar con normativas y guías técnicas que establecen criterios avanzados de diseño y ensayo de anclajes, tales como:

ASTM E488/E488M-22 - Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements (Métodos de prueba estándar para la resistencia de anclajes en elementos de hormigón), que establece los métodos para evaluar la resistencia de anclajes, tanto embebidos como post-instalados, en elementos de concreto bajo cargas de tracción y corte. Incluye ensayos en condiciones estáticas, sísmicas y de impacto, aplicables en este caso para validar la conexión de los anclajes de las pilas a la estructura de concreto.

Este es el ensayo que se realizó en la obra en los anclajes de las pilas.

PTI DC35.1-14 - Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors, que proporciona lineamientos para el diseño, instalación, pruebas de aceptación y control de calidad de anclajes en roca y suelo.

3.6 Estudio geotécnico

El proyecto de edificación, con cota de implantación 1493 ms.n.m. ubicado en una zona caracterizada por la presencia de formaciones rocosas del Batolito Antioqueño, requirió de un estudio geotécnico para definir las condiciones del subsuelo y su influencia sobre el diseño de cimentaciones profundas. Se realizaron cinco sondeos exploratorios con profundidades entre 13.4 y 35.0 m, mediante perforación con equipo hidráulico y métodos de percusión, incluyendo pruebas SPT y recuperación de muestras alteradas e inalteradas. Entre los resultados obtenidos en este estudio de suelos se encuentra la capacidad por punta de 3.5 MPa y un aporte por fuste de 13 KPa. Durante la época en que se realizó la exploración de campo (mayo, 2022), se reportó el nivel freático a 7.0 m con respecto a la cota del terreno.

4. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo se implementó una metodología que combinó la observación directa, el análisis documental y la investigación bibliográfica, con el fin de obtener una comprensión integral sobre el proceso de construcción y anclaje de pilas a roca en el contexto del proyecto ubicado en el municipio de Bello, Antioquia. Para ello, se combinó la experiencia directa en campo con el análisis riguroso de la información técnica suministrada por la constructora y la revisión de fuentes bibliográficas y normativas especializadas.

Este enfoque permitió no solo documentar las etapas de ejecución de la cimentación, sino también interpretar su fundamento técnico, las consideraciones geotécnicas y estructurales implicadas, y la manera en que la solución adoptada responde a las exigencias del terreno y las cargas de la estructura. La metodología, por tanto, integró la observación in situ de las actividades de obra, el estudio de documentos y planos, y la investigación documental, asegurando que el análisis final se sustentara en datos verificables, experiencias reales y principios de ingeniería sólidamente establecidos.

1. La primera etapa consistió en la observación y participación directa en la obra durante el proceso constructivo de las pilas ancladas. Este trabajo de campo permitió registrar de manera detallada cada fase de ejecución, desde la excavación hasta el vaciado y anclaje, identificando procedimientos, equipos utilizados, tiempos de ejecución y condiciones reales del terreno. La interacción con el personal técnico y operativo facilitó la comprensión de las decisiones constructivas adoptadas y su relación con las especificaciones del diseño, aportando así información de primera mano y un contexto real que enriquece el análisis técnico.

2. Posteriormente, se llevó a cabo la revisión de la documentación técnica suministrada por la empresa constructora. Entre estos documentos se incluyeron el estudio geotécnico del suelo, planos estructurales y arquitectónicos, memorias de cálculo, especificaciones técnicas y demás información relevante para la ejecución de la obra. Este paso permitió comprender las condiciones geotécnicas del terreno, las propiedades mecánicas de la roca de anclaje, así como las dimensiones,

capacidades y disposiciones de las pilas y sus respectivos anclajes, garantizando que el análisis estuviera respaldado por datos técnicos precisos.

3. Con el fin de sustentar técnicamente la información obtenida, se desarrolló una investigación bibliográfica y documental en diversas fuentes académicas, normativas y técnicas. Esta fase incluyó la consulta de literatura especializada, normas nacionales e internacionales aplicables, artículos científicos y manuales técnicos, con el objetivo de comprender los fundamentos teóricos del diseño y la construcción de pilas ancladas a roca. Esta búsqueda permitió contrastar la práctica observada en obra con los lineamientos teóricos y normativos, identificando buenas prácticas y aspectos a mejorar.

4. Finalmente, se procedió a la elaboración del informe, en el que se integraron los hallazgos de las fases anteriores. La redacción se realizó de manera estructurada, siguiendo el formato académico exigido, y procurando que la información fuera clara, precisa y sustentada en evidencias tanto documentales como empíricas. El documento incluye análisis técnicos, interpretación de datos, descripción de procesos constructivos y conclusiones fundamentadas, garantizando que el resultado final cumpla con los estándares de calidad requeridos en un trabajo de grado de ingeniería civil.

5. Análisis de resultados

5.1 Descripción general de la obra

El proyecto Belo Horizonte, corresponde a una edificación de uso residencial que consta de 3 torres y zonas comunes. La edificación objeto de estudio, es la Torre 2, la cual tiene una altura aproximada de 79.50 m, es una edificación nueva de 30 pisos. Esta torre se clasifica como un sistema estructural de muros vaciados de concreto reforzado. La estructura se diseña para una demanda especial de disipación de energía, DES.

El desarrollo de este trabajo se centra en las cimentaciones de la torre 2, específicamente en las pilas que se anclan a la roca. Esta estructura se apoya en un sistema de pilas diseñadas para garantizar la estabilidad frente a cargas verticales y horizontales, evitar asentamientos excesivos y optimizar el desempeño estructural.

5.2 Condiciones geotécnicas

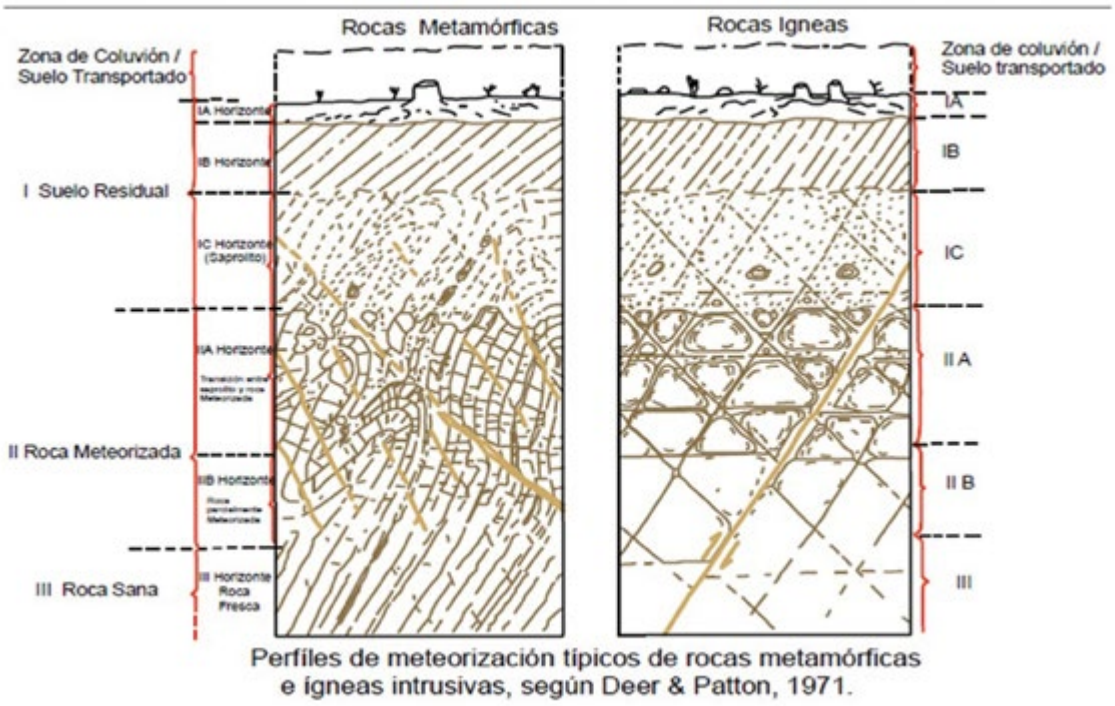
Para la evaluación geotécnica del proyecto, se realizó una visita de reconocimiento al predio, se consultó información disponible en los archivos de la empresa de geotecnia, se realizaron exploraciones correspondientes a 5 sondeos entre 13.4 y 35.0 m de profundidad, los cuales fueron realizados con equipo hidráulico, implementando métodos de percusión, incluyendo pruebas SPT y toma de muestras a intervalos de 1.0 m. En presencia de bloques rocosos, el avance corresponde a rotación con corona de diamante; esta fase de exploraciones incluyó además el registro del nivel freático. Posteriormente, las muestras recuperadas en esta etapa fueron remitidas al laboratorio, para reconocimiento y análisis.

Los resultados de estos fueron los siguientes:

- Se concluye un modelo geotécnico local o un perfil simplificado, caracterizado por la presencia de suelos residuales maduros, saprolitos y rocas parcialmente alteradas, suprayacidos por depósitos antrópicos, mezclados con material orgánico. Para el caso de los suelos residuales, estos se asocian a los horizontes IC a IIA-IIB (Deere & Patton) u horizonte IV a II (Dearman – Hong Kong).

Figura 1

Perfil de meteorización de rocas metamórficas e ígneas intrusivas (Deere & Patton, 1971).



Nota. Fuente https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegeologia/article/download/4531/5255#f06en (Boletín de Geología UIS, 2020).

Tabla 1

Esquema de meteorización de un macizo rocoso. Deere y Patton, 1971.

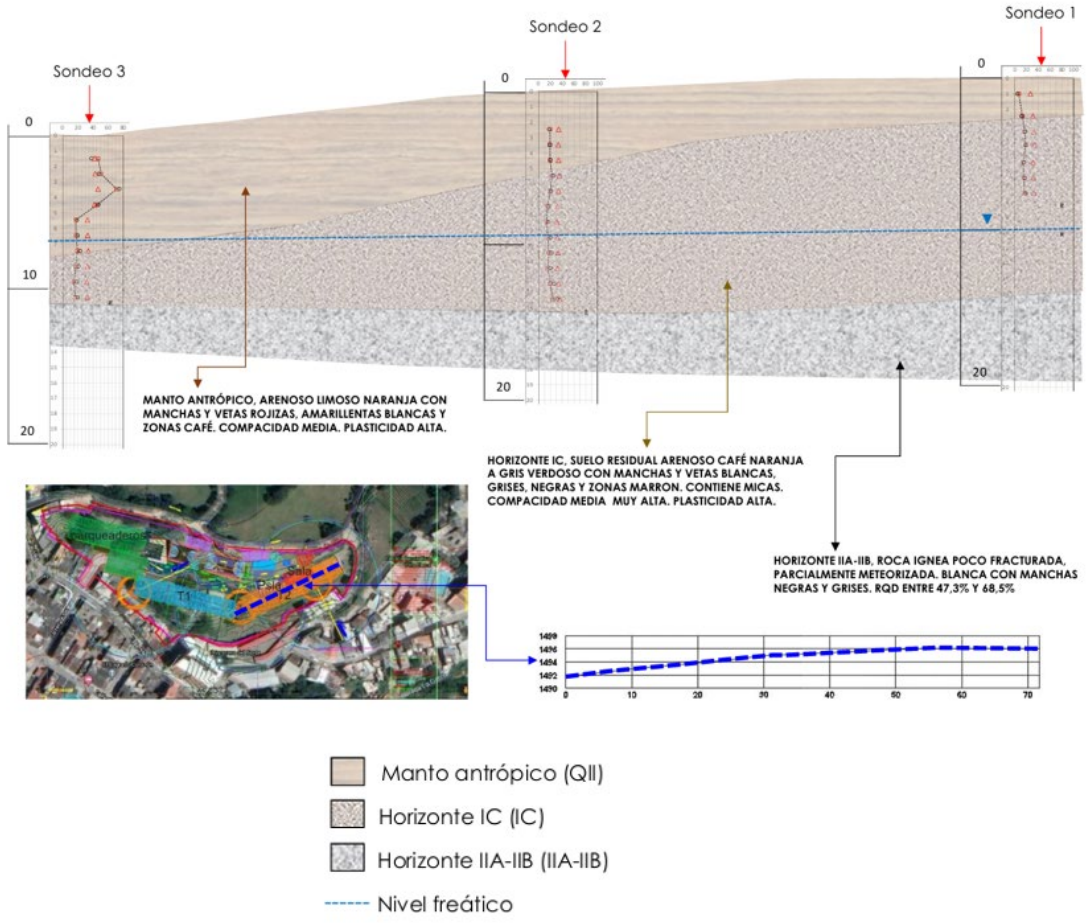
DEERE Y PATTON 1971		**CARACTERÍSTICAS DEL SUELO**
I SUELO RESIDUAL	HORIZONTE 1A	Generalmente de color oscuro.
	HORIZONTE 1B	La capa superior contiene grandes cantidades de materia orgánica. Todo el material rocoso es convertido en suelo.
	HORIZONTE 1C SAPROLITOS	Roca decolorada pasando generalmente a colores variados. Material rocoso completamente descompuesto y desintegrado al suelo, pero aun conservando algo de la estructura original. Las estructuras heredadas (diaclasas, planos de estratificación y fallas se conservan).
II ROCA METEORIZADA	IIA TRANSICIÓN DESDE SAPROPITO HASTA ROCA METERORIZADA	Roca decolorada y altamente alterada, el 50% de su estructura se encuentra desintegrada a suelo. Las estructuras heredadas (diaclasas, planos de estratificación y fallas se conservan).
	IIB ROCA PARCIALMENTE METEORIZADA	Roca con notable meteorización y considerablemente alterada, en la cual al menos el 50% de la estructura es desintegrada a suelo. Las discontinuidades pueden estar oxidadas o abiertas.
III ROCA NO METEORIZADA		La roca puede estar débilmente decolorada en la superficie de las discontinuidades, las cuales pueden estar abiertas y oxidadas. Rocas sin signos de desintegración, la superficie de las discontinuidades con ligera decoloración.

Nota. Adaptado de Deere y Patton (1971).

- Nivel freático: Durante la época en que se realizó la exploración de campo (mayo, 2022), se reportó el nivel freático entre 7.0 y 20.0 m con respecto a la cota actual del terreno.

A continuación, se presenta un perfil o modelo geotécnico local, en el cual puede apreciarse la disposición de los mantos reportados:

Figura 2
Modelo geotécnico local



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Los parámetros de resistencia concluidos por los procedimientos descritos y los finalmente adoptados, se presentan a continuación:

En el **Horizonte IC**, el peso unitario (γ) varía entre 17,5 y 21,0 kN/m³, con ángulos de fricción interna (φ) entre 26,0° y 35,6° y cohesiones aparentes de hasta 18 kPa. Estos valores

indican un material de competencia media a alta. El módulo de elasticidad (E) alcanza valores de hasta 27,8 MPa, lo que sugiere un comportamiento moderadamente rígido bajo carga.

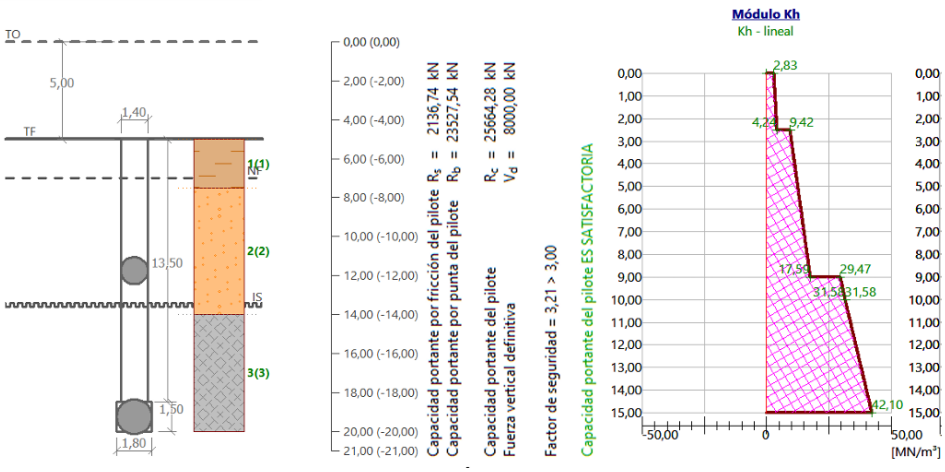
El **Horizonte IIA-IIB** presenta un incremento notable en rigidez y resistencia. El ángulo de fricción interna oscila entre 28,0° y 35,0°, con cohesiones aparentes de hasta 9,6 kPa y cohesiones no drenadas (Cu) que alcanzan 75 kPa. Los módulos de elasticidad (E) varían entre 40 y 80 MPa, evidenciando una baja compresibilidad y una capacidad sobresaliente para soportar cargas concentradas en punta.

La secuencia estratigráfica revela una transición desde materiales de resistencia media en superficie hacia estratos más rígidos y densos a mayor profundidad. Esta disposición geotécnica favorece el comportamiento de pilas convencionales, ya que permite una combinación efectiva de resistencia por fricción y por punta, asegurando control de asentamientos y desempeño estructural estable.

A continuación, se presenta el modelo de cimentación de pilas pre-excavadas recomendado por los resultados del estudio de suelos.

Figura 3

Modelo de cimentación de pilas pre-excavadas Torre 2. Módulos de reacción



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

La profundidad preliminar de desplante se estima en 15 m, considerando el apoyo en mantos rocosos y las dificultades asociadas a excavaciones manuales. Para esta longitud, se proyectan

capacidades de 3,5 MPa por punta y 13 kPa por fricción, apoyándose en ábacos que permiten dimensionar variaciones de sección, diámetro y profundidad según los rangos de carga.

En consecuencia, las condiciones identificadas justifican técnicamente la selección de cimentaciones profundas como solución, en concordancia con la NSR-10 y prácticas internacionales.

Estas condiciones para el diseño de las pilas, basadas en las recomendaciones del estudio de suelo, son las siguientes:

Los aportes por punta serán el punto de partida para dimensionamiento de ensanches en la base de la pila, dado el caso de que la carga transmitida por columna supere la capacidad prevista en elementos cilíndricos. Para efectos de conformación de grupos de pilas, se deben manejar espaciamientos de mínimo 2.75 D (D=diámetro), para caso de eficiencia 1.0.

El análisis de asentamiento se calcula igualmente por la metodología descrita por H.G. Poulos, basado en la teoría de elasticidad y modificaciones de atribuidas a mediciones in-situ. El método permite la construcción de la curva de carga-asentamiento para un pilote a partir de la capacidad por fricción y punta. Para este caso, los asentamientos límites de 30 mm condicionan la carga de pilas a 7,8 MN. Los asentamientos teóricos inmediatos, se estiman del orden de 3 mm para cargas hasta de 2,8 MN.

5.3 Diseño de pilas inicial

A partir de los resultados del estudio geotécnico, que evidenciaron la presencia de estratos con buena capacidad portante y espesores suficientes para recibir las cargas de la estructura, se planteó como solución preliminar de cimentación el uso de pilas pre-excavadas. Este tipo de cimentación, construida mediante perforación y vaciado de concreto in-situ, fue escogida por su eficiencia para llevar las cargas verticales hasta los estratos más competentes identificados en profundidad y por su versatilidad frente a las condiciones del terreno. El diseño de esta tipología se desarrolló tomando como referencia los valores de resistencia al corte, compresibilidad y módulo de deformación determinados para los diferentes horizontes de suelo, asegurando así que la propuesta cumpliera con los requisitos de seguridad y funcionalidad establecidos en la normativa aplicable.

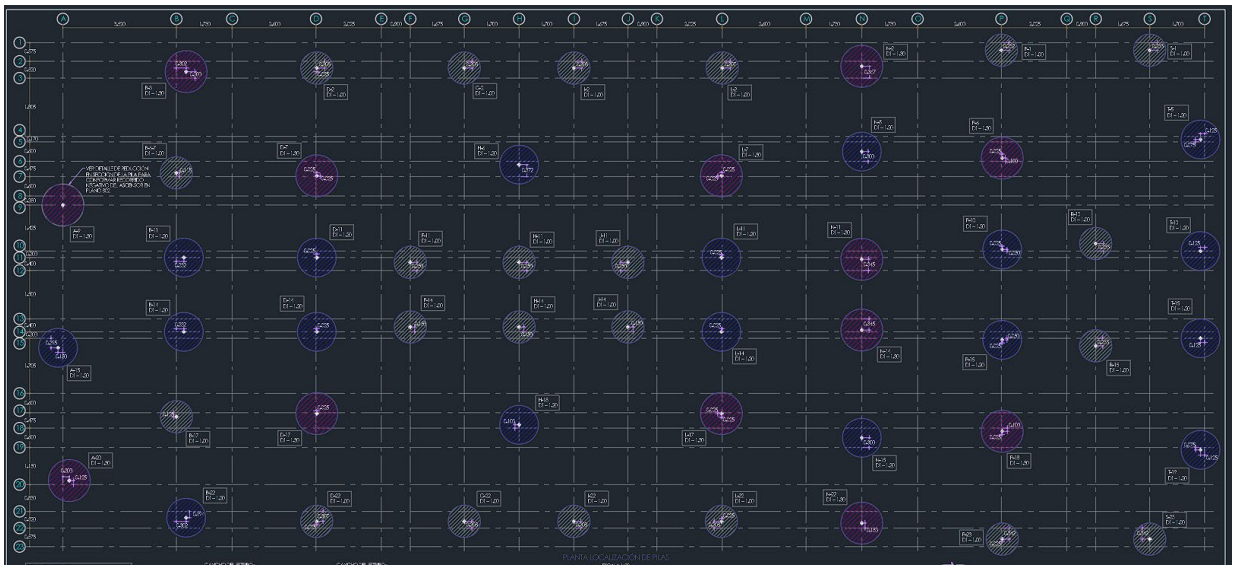
El diseño inicial de cimentación contempla un conjunto de pilas pre-excavadas de 53 pilas, 35 por excavación manual y 18 por excavado mecánico, con diámetros variables de 1.0, 1.20 y 130 m, dentro de estas 53 pilas. Esto se define en función de las cargas transmitidas por cada elemento estructural y de las condiciones geotécnicas específicas en cada ubicación.

Para este dimensionamiento de los fustes se verifica que las solicitaciones axiales no excedan los límites establecidos el numeral C.15.11.3 del Reglamento NSR-10. Las profundidades proyectadas, oscilan entre 15.0 m y 18.0 m, sin campanas o ensanchamientos en la base, estas responden a la necesidad de alcanzar estratos competentes que aseguren el adecuado desempeño de la cimentación. La disposición de las pilas a lo largo de la planta obedece a la alineación con los ejes estructurales principales, optimizando la transferencia de esfuerzos y minimizando desplazamientos diferenciales. Este planteamiento, producto de la fase de cálculo estructural y de la interpretación del estudio de suelos, constituye la base operativa con la que se inició las labores de cimentación.

A continuación, se muestra el plano general en planta de las pilas con su debida nomenclatura y el diámetro del fuste:

Figura 4

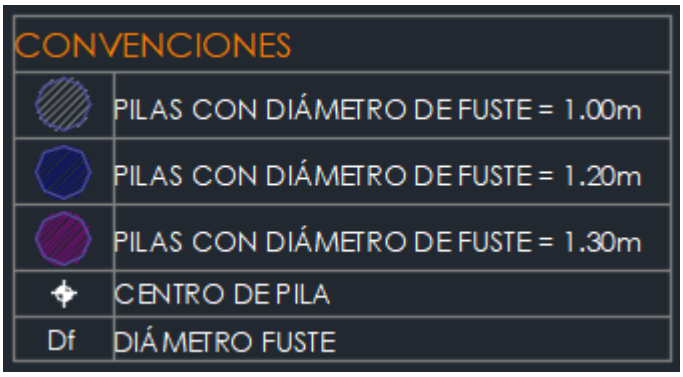
Pilas de cimentación



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Figura 5

Convenciones de pilas de cimentación

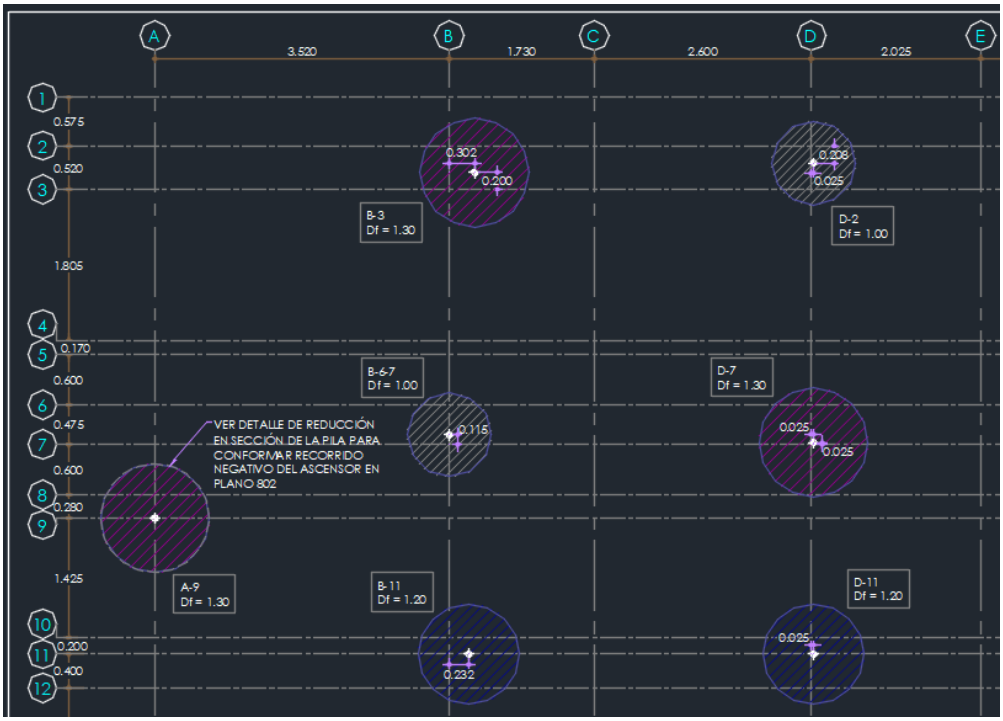


Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Se presentan fragmentos del plano general, con sentido de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Desde la **Figura *6*** hasta la **Figura *11***.

Figura 6

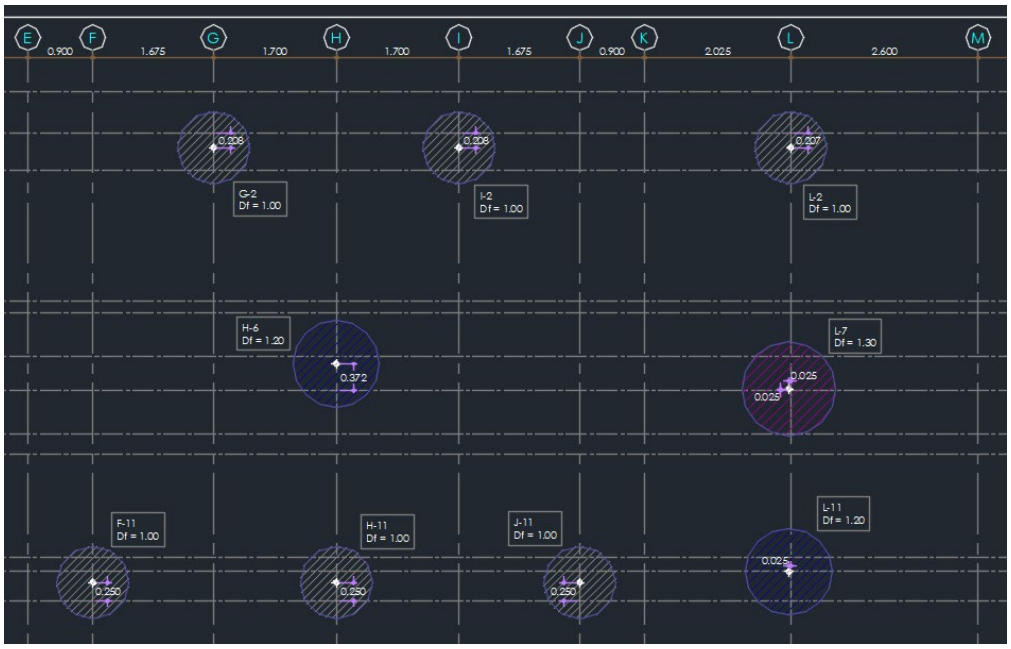
Pilas de cimentación (del eje 1A al 12E)



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Figura 7

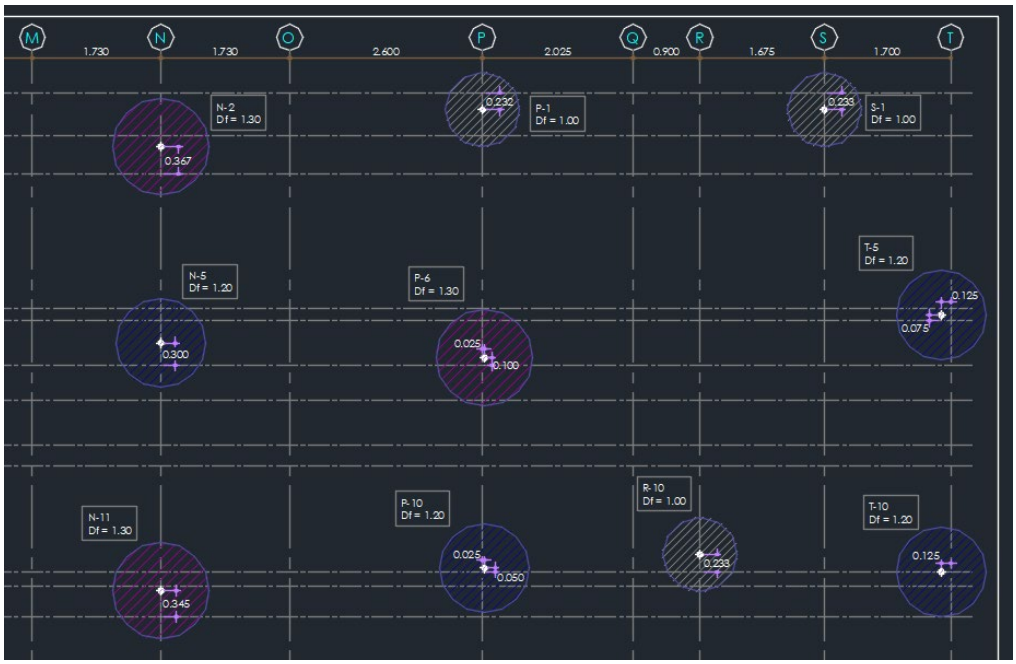
Pilas de cimentación (del eje 1E al 12M)



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Figura 8

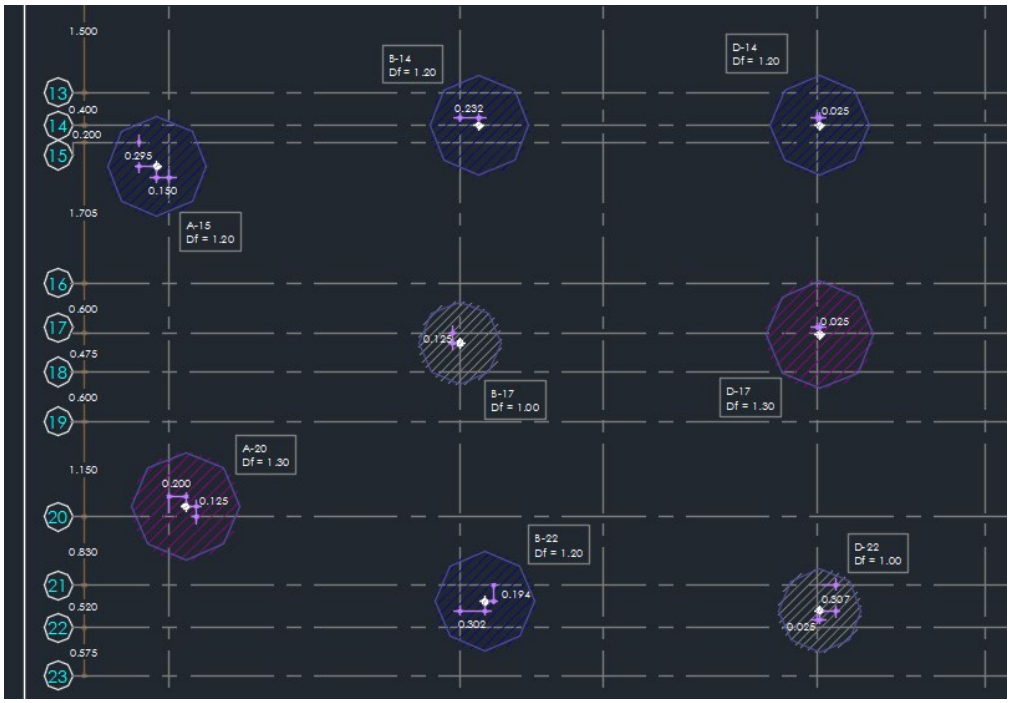
Pilas de cimentación (del eje 1M al 12T)



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Figura 9

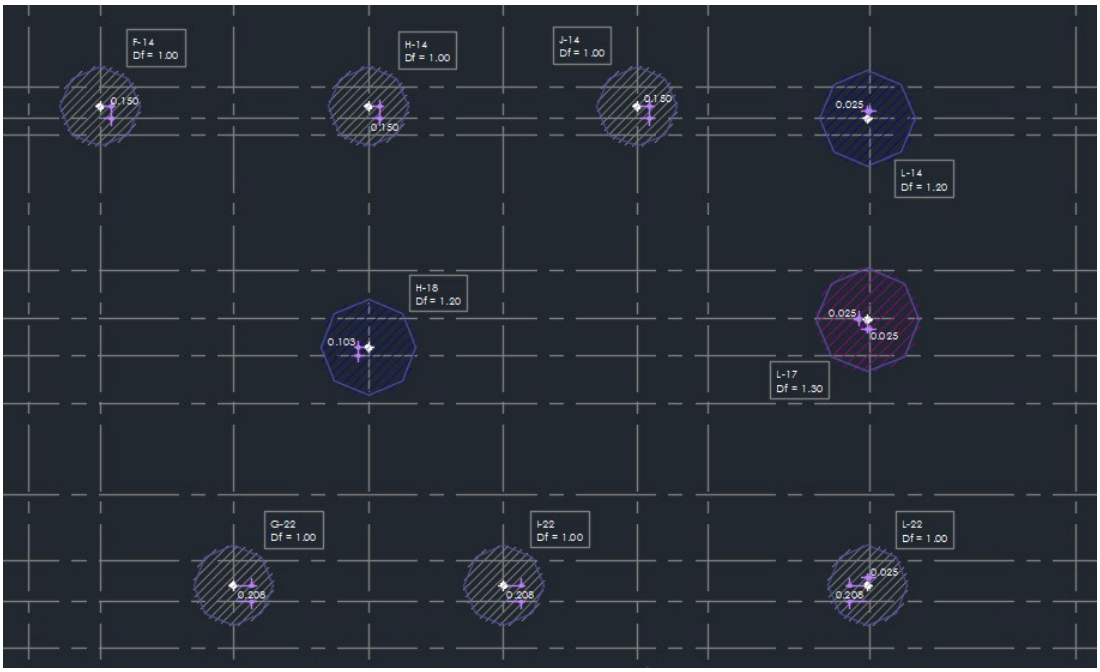
Pilas de cimentación (del eje 13A al 23E)



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Figura 10

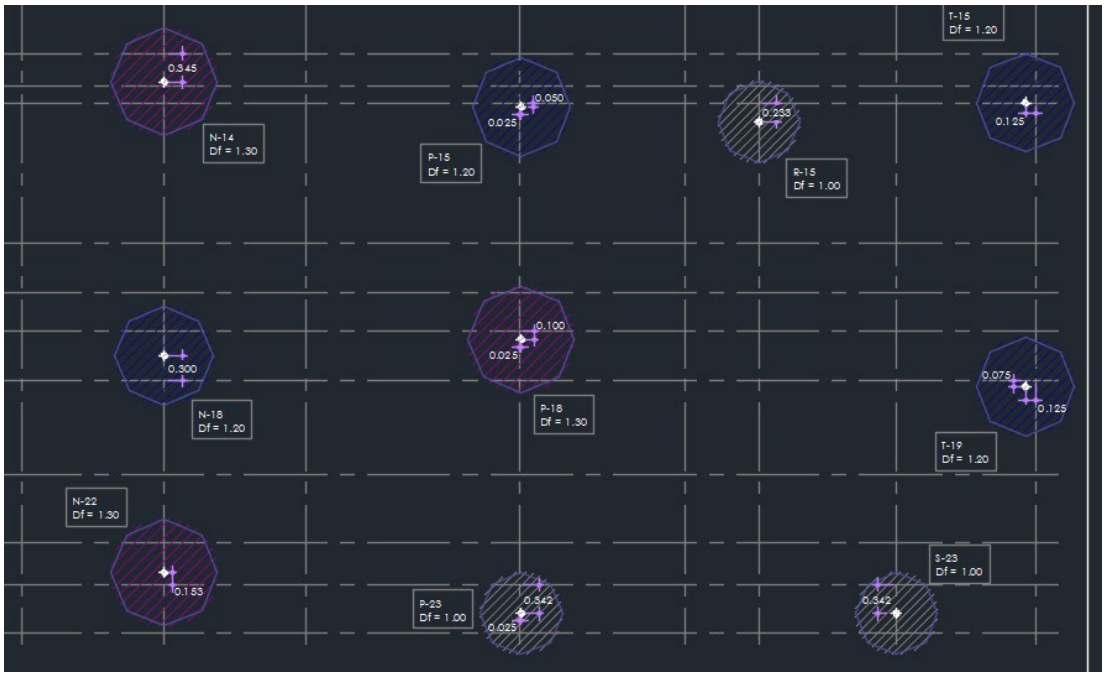
Pilas de cimentación (del eje 13E al 23M)



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

Figura 11

Pilas de cimentación (del eje 13M al 23T)



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

5.4 Pilas ancladas a roca

5.4.1 Contexto del hallazgo en obra

Durante el proceso constructivo se presentó una condición no prevista: en algunos ejes se identificó la presencia de roca a profundidades significativamente menores a las establecidas en el diseño inicial. Esta situación generó una discrepancia entre lo proyectado y las condiciones geotécnicas reales encontradas en obra. Inicialmente, se intentó perforar el macizo rocoso con el fin de alcanzar las profundidades establecidas para cada pila; sin embargo, debido a la dureza y continuidad de la roca, no fue posible lograr la profundidad proyectada (***Figura 12***).

Figura 12
Perforación de la roca en la pila



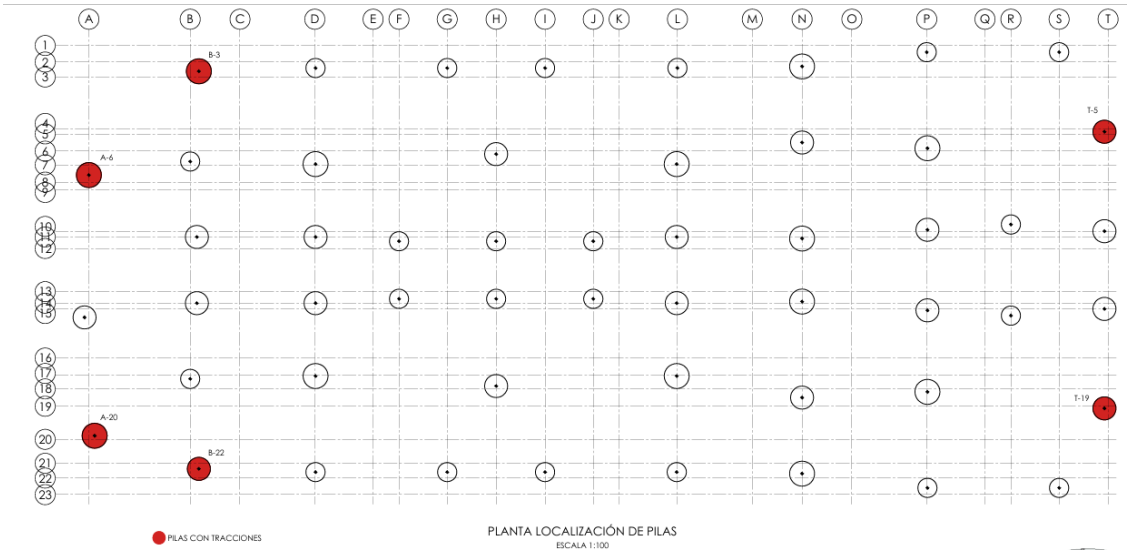
Primeramente, se encontró con 6 pilas las cuales trabajan principalmente bajo esfuerzos a tracción. Una pila trabajando a tracción es aquella que, en lugar de transmitir cargas verticales de compresión hacia el suelo o la roca, debe resistir fuerzas que tienden a extraerla del terreno. Estas solicitaciones se generan por efectos externos como el volcamiento inducido por cargas de viento en edificaciones de gran altura, la acción sísmica, o bien por empujes laterales de tierras y agua subterránea en excavaciones profundas (NSR-10, Título H).

La resistencia a tracción de una pila no depende de la capacidad portante por punta, sino fundamentalmente de la adherencia y fricción a lo largo del fuste con el estrato circundante. La preocupación en estas pilas era mayor, ya que ninguna de ellas alcanzaba la profundidad requerida.

Ante esta situación, se llevó a cabo una reunión entre el geotecnista y el calculista estructural, quienes analizaron las condiciones presentes y replantearon la solución de cimentación. La estrategia adoptada consistió en aprovechar la resistencia del macizo rocoso como elemento de anclaje, y se ajustó la profundidad de las pilas. Respondiendo así a la necesidad de garantizar la estabilidad frente a las cargas de levantamiento y esfuerzos horizontales.

Figura 13

Planta localización de pilas a tracción



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

A su vez, se identificó que, en varias pilas adicionales se presentaba la aparición de roca a profundidades menores a las previstas en el diseño inicial. Ante esta situación, nuevamente se llevó a cabo una reunión entre el geotecnista y el diseñador estructural, con el fin de evaluar cómo proceder frente a estas nuevas condiciones de solicitación y garantizar el adecuado desempeño de la cimentación. Como resultado de dicho análisis, se determinó anclar a la roca todas aquellas pilas que no alcanzaran una profundidad final mínima de 8 m.

A continuación, se presenta la tabla con el cuadro de anclajes en la ***Tabla 2*** y el detalle correspondiente para pilas ancladas a roca en la **Figura *14***.

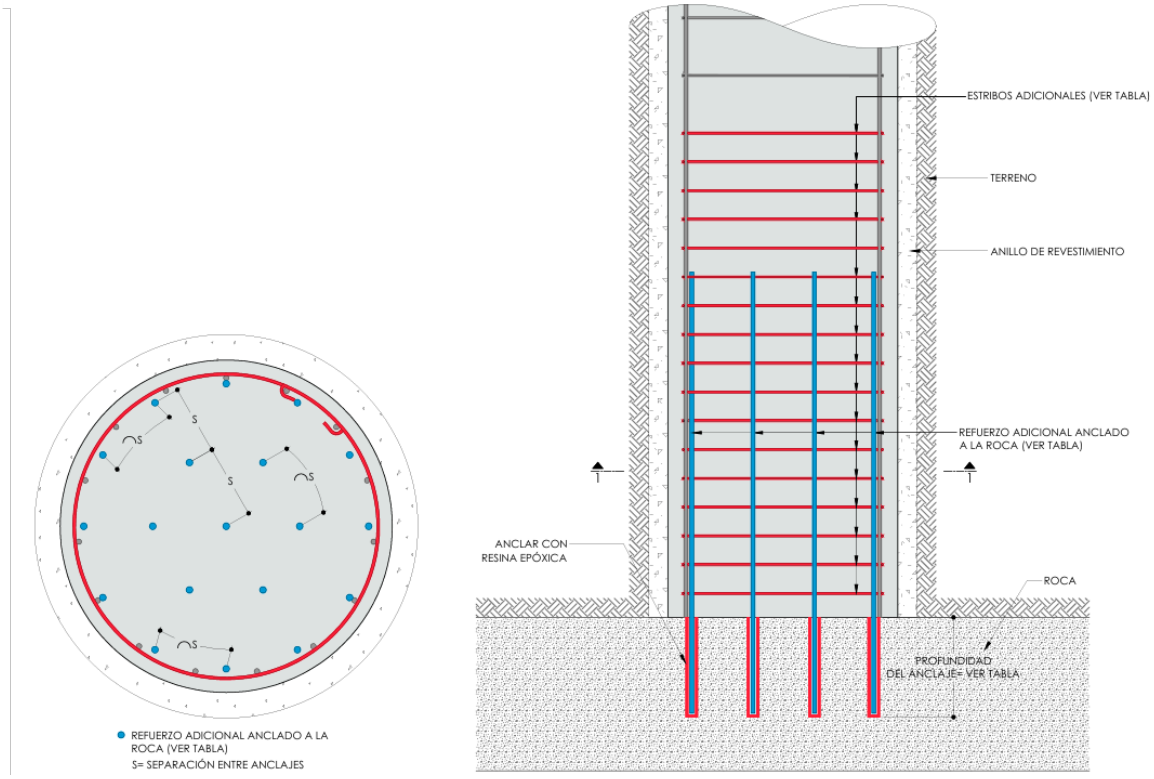
Tabla 2

Cuadro de anclajes

PILA	DIAMETRO FUSTE Df [m]	REFUERZO LONGITUDINAL	REFUERZO TRANSVERSAL ESTRIBOS	PROFUNDIDAD DEL ANCLAJE [m]
A-6	1.30	6ϕ1"L=2.0	35ESTϕ1/2" (1@7.5)	0.50
A-20	1.30	23ϕ3/4"L=2.1	35ESTϕ1/2" (1@7.5)	0.60
B-22	1.20	9ϕ3/4"L=2.0	32ESTϕ1/2" (1@7.5)	0.50
B-3	1.30	13ϕ3/4"L=2.0	35ESTϕ1/2" (1@7.5)	0.50
T-19	1.20	11ϕ3/4"L=2.0	32ESTϕ1/2" (1@7.5)	0.50
T-5	1.20	10ϕ3/4"L=2.0	32ESTϕ1/2" (1@7.5)	0.50
PILAS CON LONGITUD FINAL MENOR A 8.0m	VARIABLE	6ϕ1"L=2.0	16ESTϕ1/2" (1@10.0)	0.50

Figura 14

Detalle de anclaje a la roca



Nota. Fuente: Archivo técnico de la obra, Proyecto Belo Horizonte, Torre 2.

5.4.2 Proceso constructivo de las pilas ancladas

5.4.2.1 Marcación y replanteo de pilas

El proceso inició con el replanteo en obra de la ubicación de las pilas, con ayuda de la topografía, la localización y la nivelación tomando como referencia los ejes estructurales definidos en el plano. Según la NSR-10 (2010), el replanteo constituye una de las etapas más críticas dentro de la ejecución de cimentaciones profundas, puesto que los errores de localización son prácticamente imposibles de corregir una vez que la pila ha sido vaciada. Tanto para las pilas manuales como para las mecánicas, los pileros delimitan la circunferencia alrededor del centro de la pila y comienzan a excavar.

5.4.2.2 Excavación y vaciado de pilas: mecánica y manual

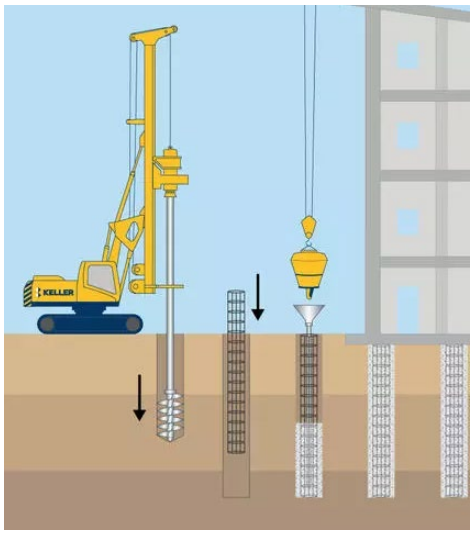
La **excavación de las pilas mecánicas** en el proyecto se realizó mediante el uso de una piloteadora Soilmec SR-30, equipo rotatorio de perforación de alto rendimiento, diseñado para la ejecución de cimentaciones profundas. El procedimiento inicia con la ubicación precisa de la máquina en el eje de la pila, asegurando la verticalidad mediante el sistema de nivelación del mástil. Posteriormente, se emplea una herramienta de perforación como lo es la barrena, que, mediante el accionamiento hidráulico del cabezal rotatorio, permite remover el suelo en profundidad de manera progresiva. El material excavado se extrae en cada ciclo y se deposita en superficie para su disposición. A medida que se avanza, se controla la alineación y verticalidad de la perforación con el sistema de monitoreo integrado en la máquina, garantizando la geometría del fuste. En suelos cohesivos y de baja resistencia, como en este caso, se utiliza barrena, mientras que en presencia de estratos de mayor dureza o roca alterada se emplean herramientas con dientes de corte reforzado.

En algunos casos, donde las paredes de las pilas se derrumbaban, se controló mediante encamisado temporal, el cual se retiraba una vez se completaba el vaciado de concreto.

Finalmente, una vez alcanzada la profundidad de diseño, se limpia el fondo de la excavación y se procede a la instalación del refuerzo y vaciado de concreto por la metodología Tremie, la cual es una técnica para colocar concreto de manera continua en cimentaciones profundas o bajo el agua, se utiliza una tubería con una tolva en su extremo superior y manteniendo el extremo inferior del tubo sumergido en el concreto para evitar la entrada de aire y desplazar el agua o el lodo contaminante. Como se muestra a continuación en ***Figura 15***.

Figura 15

Ilustración de vaciado con metodología Tremie



Nota. Fuente: Keller Cimentaciones de Latinoamérica (2025).

A continuación, se presenta el registro fotográfico correspondiente al proceso constructivo de las pilas mecánicas, el cual permite evidenciar de manera secuencial las actividades realizadas en obra, desde la excavación hasta el vaciado de concreto en el elemento de cimentación.

Figura 16

Perforación, instalación de refuerzo y vaciado de concreto



En el caso de las **pilas excavadas de manera manual**, el procedimiento inicia con la delimitación de la circunferencia en el terreno, garantizando que coincida el diámetro de diseño y la excavación real. Una vez marcado el perímetro, los pileros comienzan a excavar empleando herramientas manuales como taladros perforadores manuales, barras, picos y palas.

Figura 17
Excavación manual de pilas



Durante el avance, y con el fin de garantizar la estabilidad de las paredes del pozo, se construyen anillos de entibado en concreto simple cada que se excava un metro de profundidad, de manera que funcionen como un soporte temporal y permanente que impida deslizamientos o colapsos del suelo. Para no alterar el diámetro del fuste proyectado, dichos anillos son considerados desde el inicio en el diseño de la excavación, asegurando así la geometría final de la pila.

Figura 18

Anillado de entibación en excavación de pila



Conforme la excavación alcanza mayor profundidad, la extracción manual del material se torna más compleja. En este punto, se empieza a hacer uso de un molinete [1] que permite izar baldes cargados con el material excavado hasta la superficie. Este método facilita el trabajo y reduce los riesgos asociados a la manipulación en espacios confinados.

[1] El molinete es un dispositivo manual de izado compuesto por un tambor giratorio y un sistema de cuerda o cable, utilizado en excavaciones profundas para extraer baldes con material suelto.

Figura 19

Extracción de material con molinete



Una vez alcanzada la profundidad prevista, se procede a la limpieza del fondo del pozo, retirando partículas sueltas y verificando que la base quede nivelada, firme y libre de material inadecuado que pudiera afectar la capacidad de apoyo.

Posteriormente, para el caso de **pilas convencionales**, se instalan los elementos de refuerzo y se procede con el vaciado de concreto, con una resistencia de 210 kg/cm2, por el método Tremie.

5.4.2.3 Perforación y anclaje a roca

Para la etapa constructiva de las **pilas ancladas a la roca**, que son las pilas que no alcanzaron la profundidad de diseño inicial, el primer paso es realizar las perforaciones en la roca como lo dice el plano de Detalle de anclaje a roca (**Figura *14***) y el Cuadro de anclajes (**Tabla 2**).

La instalación de los anclajes en roca se realizó utilizando el adhesivo epóxico inyectable Hilti HIT-RE 500, es una resina epóxico de alto rendimiento para conexiones de barras/ anclajes de altas cargas en concreto fisurado y no fisurado, con certificaciones para condiciones secas,

húmedas y bajo agua, resistencia sísmica y comportamiento al fuego (Hilti Corporation, 2018). Este producto forma parte del portafolio de soluciones de Hilti, empresa multinacional con sede en Liechtenstein, reconocida mundialmente por el desarrollo de herramientas, sistemas de anclaje y soluciones de ingeniería para la construcción profesional (Hilti Corporation, 2025).

Figura 20

Sistema de anclaje epóxico Hilti HIT-RE 500



Nota. Fuente: Hilti Corporation (n.d.). HIT-RE 500 V3 epoxy anchoring system. Recuperado de https://www.hilti.group/.

Para garantizar la correcta aplicación del producto y la calidad del procedimiento, se contó con la visita de un asesor técnico de Hilti en la obra, quien realizó una inducción sobre el uso del epóxico HIT-RE 500 V3 y los procedimientos de instalación asociados. Durante esta capacitación se enfatizaron aspectos como la limpieza rigurosa de las perforaciones, los tiempos de aplicación y curado, el control de calidad en obra y los criterios de aceptación exigidos por el fabricante. Esta asistencia inicial permitió estandarizar el procedimiento constructivo y asegurar que la instalación de los anclajes cumpliera con las especificaciones técnicas de Hilti y las normas internacionales vigentes.

Siguiendo las recomendaciones del asesor y lo indicado en el manual técnico del Hilti HIT-RE 500 V3, se describe el procedimiento para la instalación de anclajes de acero en la roca:

1. El proceso comienza con la revisión de los planos estructurales, donde se verifican las especificaciones correspondientes a cada una de las pilas a anclar. En esta etapa es fundamental identificar con claridad el diámetro de las barras de refuerzo, el número requerido, la longitud total y, en particular, la longitud destinada al anclaje dentro de la

roca. Una vez definidos estos parámetros, se procede a marcar sobre la barra corrugada la longitud de empotramiento en roca, utilizando cinta adhesiva como referencia visual. Esta marcación permite controlar la profundidad de la perforación.

2. Luego, procedemos con las perforaciones. Las perforaciones en la roca se deben realizar con taladro roto-percutor, el cual garantiza una superficie rugosa, con un diámetro de broca 1/4" mayor que el diámetro de la barra de refuerzo a anclar, lo que permite la adecuada inyección del adhesivo asegurando una envolvente uniforme alrededor del acero y garantizando el desempeño estructural del anclaje. Una vez se tiene las perforaciones, se procede a comprobar la profundidad introduciendo la barra corrugada y garantizando que entre sin dificultad.

3. Posteriormente, se realiza la limpieza de los orificios, etapa crítica para la adherencia del anclaje. Una correcta limpieza es esencial, para esto se usa un cepillo de alambre para eliminar el material restante y aire para secarlo, se repite la operación hasta remover por completo los restos de polvo y fragmentos de roca.

4. Consecutivamente, se coloca el cartucho de HIT-RE 500 en el porta cartuchos, se coloca la boquilla mezcladora en el cartucho, seguidamente se inserta el porta cartuchos en el dispensador. Como lo recomienda Hilti en su manual técnico, se descartan las dos primeras descargas del adhesivo hasta asegurar que la mezcla salga homogénea en color y consistencia.

5. Una vez preparada el epóxico y verificada la homogeneidad de la mezcla, se procede a la inyección del adhesivo en la barra. La boquilla mezcladora debe introducirse hasta el fondo del orificio, de manera que el llenado inicie desde la base y se realice en forma retráctil al ir retirando lentamente la boquilla mezcladora. El adhesivo se coloca hasta llenar aproximadamente dos tercios (2/3) de la perforación, evitando la formación de vacíos o burbujas de aire que puedan comprometer la adherencia del sistema. Para garantizar el llenado de 2/3 de la barra, la boquilla mezcladora se marcó externamente

con una referencia equivalente a 1/3 de la profundidad total; de esta forma, cuando dicha marca quedaba alineada con el borde del orificio, se sabía que en el interior se había completado el llenado requerido de 2/3.

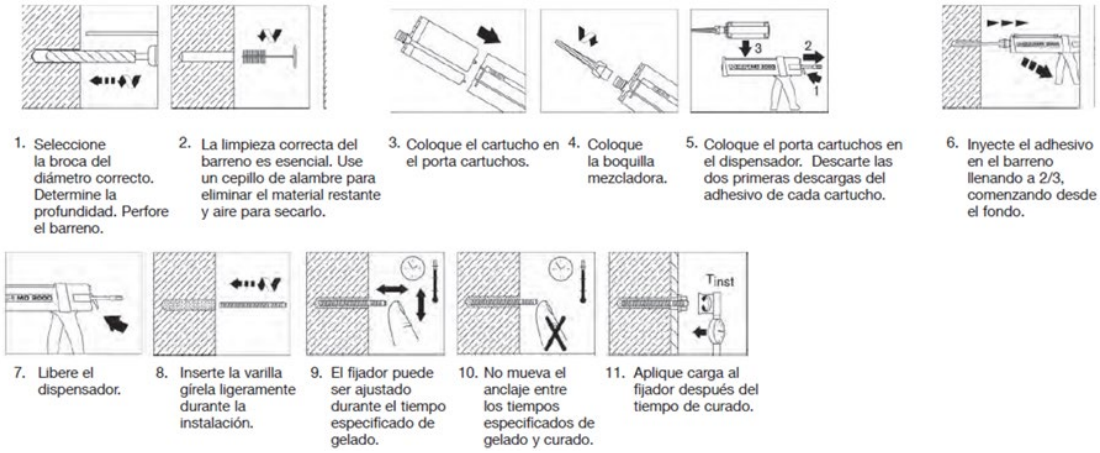
6. Inmediatamente después de la inyección, se debe introducir la barra de refuerzo aplicando un movimiento de torción para garantizar una correcta adherencia. Una vez posicionada, no debe retirarse ni girarse en sentido contrario, permitiéndose únicamente pequeños ajustes de alineación durante los primeros segundos, mientras el epóxico permanece fluido. Se debe verificar que la barra alcance la profundidad efectiva, identificada por la marca al ras de la superficie, y comprobar la presencia de rebose perimetral de adhesivo, retirando únicamente el exceso superficial sin desplazar el acero.

7. Posterior a esto, la barra debe mantenerse en reposo, sin someterla a vibraciones ni cargas, hasta completar el tiempo de curado indicado por el fabricante para la temperatura ambiente registrada, para este caso se dejó un tiempo de 7 horas de curado para una temperatura mayor a los 20°C, garantizando así el desarrollo pleno de la resistencia del anclaje.

Para mayor claridad en la secuencia, la ***Figura 21*** presenta el procedimiento resumido propuesto por Hilti para la colocación de barras de refuerzo con adhesivo epóxico HIT-RE 500, donde se ilustran los pasos de perforación, limpieza, inyección y colocación de la barra hasta el tiempo de curado.

Figura 21

Instrucciones para la instalación del sistema HIT-RE 500



Nota. Fuente: https://www.hilti.com.

Una vez completado el proceso de inyección y curado, las barras de refuerzo quedan fijadas en la roca de acuerdo con las especificaciones del fabricante. En la ***Figura 22*** se muestra el resultado de la instalación de los anclajes, donde se observa la correcta alineación, separación y la longitud expuesta de las barras para su posterior conexión estructural.

Figura 22

Barras de refuerzo ancladas a la roca mediante el adhesivo epóxico HIT-RE 500



8. Durante el anclaje de las barras de refuerzo se dejó un anclaje adicional destinado a la ejecución de la prueba de tracción conforme a la norma ASTM E488. El propósito de este ensayo fue verificar la resistencia a la carga de extracción y el desempeño del sistema de anclaje, asegurando que cumpla con las especificaciones de diseño y las recomendaciones del fabricante. Durante la prueba se aplicó carga controlada mediante equipo de ensayo calibrado, registrando desplazamientos y comportamiento del anclaje. La ausencia de fallas prematuras o movimientos excesivos confirmó la adecuada adherencia del sistema adhesivo-acero-roca, garantizando la confiabilidad de los anclajes instalados.

Figura 23

Ensayo de tracción estática en anclajes



9. Finalmente, una vez asegurada la fijación de las barras ancladas en la roca y verificado el cumplimiento del tiempo de curado del adhesivo, se procede a la conexión del refuerzo principal de la pila con las barras previamente instaladas. Este empalme debe garantizar la continuidad estructural entre el acero de refuerzo y el anclaje a la roca, siguiendo los criterios de traslape definidos en los planos estructurales. Posteriormente,

se realiza el vaciado de concreto, con una resistencia de 210 kg/cm2, mediante el método *Tremie.*

Figura 24

Vaciado de concreto de pilas por método Tremie



Figura 25

Pila anclada a roca vaciada



5.4.4 Comprobación de capacidad de anclajes a roca mediante tracción estática (ASTM E488)

Con el fin de garantizar la seguridad estructural de los anclajes instalados, se llevaron a cabo ensayos de tracción conforme a la norma ASTM E488, la cual establece los procedimientos para determinar la resistencia última y la capacidad de servicio de elementos de fijación en concreto y roca. Dichas pruebas fueron realizadas bajo la presencia y supervisión del residente de obra, la interventoría y el supervisor técnico, quienes verificaron el cumplimiento estricto de los procedimientos establecidos.

En cada pila se dispuso un anclaje adicional destinado exclusivamente para ensayos de control, de manera que se evaluara la confiabilidad del sistema antes de proceder con la instalación definitiva del refuerzo y el vaciado de concreto. La metodología consistió en aplicar una carga inicial equivalente al 5 % del límite de fluencia de la barra ensayada con el objetivo de asentar el sistema. Posteriormente, se incrementó la carga en intervalos progresivos del 15 % del límite de fluencia por minuto, hasta alcanzar el 95 % de dicho límite, registrando los desplazamientos y la respuesta del anclaje en cada etapa (ASTM International, 2025).

Para ejemplificar, el ensayo realizado sobre una barra de 3/4” de diámetro, con una profundidad efectiva de 50 cm y adherida con Hilti HIT-RE 500, alcanzó una carga última corregida de 10.188 kgf, correspondiente al 80,7 % de la carga de fluencia. Al comparar este valor con la carga de servicio especificada de 2.547 kgf, se evidencia un factor de seguridad superior a 4,0, lo que confirma la eficiencia del sistema de adherencia epóxica y su capacidad para transferir esfuerzos de manera adecuada al macizo rocoso (Hilti, 2025).

Cabe destacar que, considerando que cada pila anclada cuenta con un mínimo de seis barras de acero, la capacidad global de transmisión de cargas se multiplica significativamente, proporcionando un sistema de cimentación robusto, confiable y con desempeño adecuado frente a las condiciones geotécnicas complejas del proyecto.

Diversos estudios han demostrado que, en el caso de cimentaciones profundas ancladas en roca, la probabilidad de falla está más asociada a deficiencias en los procedimientos constructivos que a la insuficiencia de la capacidad portante del macizo. Aspectos como la contaminación del fondo del taladro, la falta de limpieza de las perforaciones, la pérdida de verticalidad o el colapso de las paredes durante la excavación generan discontinuidades que afectan la adherencia y el

contacto efectivo entre el concreto, el acero y la roca. Estos factores pueden comprometer el desempeño de la pila con mayor incidencia que los asentamientos diferenciales o la resistencia propia del terreno (Haberfield & Lochaden, 2018).

Figura 26
Ensayos de tracción estática en anclajes



6. Conclusiones y recomendaciones

Adaptación del diseño frente a condiciones imprevistas: La aparición de roca competente a profundidades menores de las proyectadas inicialmente obligó a replantear el sistema de cimentación. Esta situación evidenció la importancia de la flexibilidad en los diseños geotécnicos y estructurales, puesto que las condiciones reales del subsuelo en obra rara vez corresponden de manera exacta con las asumidas en etapa de diseño.

Relevancia del control constructivo en el desempeño: Los resultados obtenidos confirmaron lo señalado por la literatura técnica: la confiabilidad de cimentaciones ancladas en roca depende más del correcto procedimiento constructivo que de la resistencia intrínseca del macizo (Haberfield & Lochaden, 2018). Aspectos como la limpieza del fondo de excavación, el uso adecuado del epóxico, el correcto montaje de los refuerzos y el cumplimiento estricto de los tiempos de curado fueron determinantes para garantizar la efectividad de los anclajes

Validación mediante ensayos de carga a tracción: La aplicación de la norma ASTM E488 permitió comprobar en obra el correcto desempeño de los anclajes. En todos los casos evaluados, las barras ancladas resistieron sin presentar fallas, alcanzando niveles de carga cercanos al 95% del límite de fluencia sin evidenciar desprendimientos ni desplazamientos excesivos. Esto corroboró que la metodología adoptada era confiable, y que el sistema de anclajes cumplía con las exigencias de seguridad estructural y normativa.

Valor del acompañamiento técnico especializado: La presencia de asesoría directa por parte de Hilti durante la implementación del adhesivo epóxico HIT-RE 500 resultó fundamental para estandarizar el procedimiento en campo y garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas del fabricante. Este acompañamiento redujo el riesgo de errores constructivos y aportó al aseguramiento de la calidad.

Lecciones aprendidas para futuros proyectos: El caso de Belo Horizonte demuestra que la cimentación profunda en condiciones geotécnicas complejas no debe verse como un

procedimiento rígido, sino como un proceso adaptable que requiere un equilibrio entre el diseño teórico y la realidad constructiva. La experiencia confirma que las soluciones ancladas a roca son una alternativa viable, eficiente y segura siempre que estén respaldadas por un control constructivo riguroso, ensayos de validación en obra y una integración efectiva entre diseñadores, constructores, asesores técnicos y supervisión.

Recomendación: Se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en evaluar con mayor detalle el comportamiento de los asentamientos en estratos rocosos sometidos a cargas transmitidas por pilas ancladas. Tal como lo plantean Haberfield y Lochaden (2018), aunque la roca presenta una elevada capacidad portante, los desplazamientos diferenciales pueden ser críticos si no se consideran de manera adecuada en el diseño. Profundizar en este aspecto contribuiría a optimizar la predicción del desempeño de la cimentación y a fortalecer los criterios de seguridad estructural en obras con condiciones similares.

Referencias

ASTM International. (2025). *ASTM E488/E488M-18: Standard test methods for strength of anchors in concrete elements*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0488_E0488M-18

Coduto, D. P. (2001). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Prentice Hall.

Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2016). *Foundation design: Principles and practices* (3rd ed.). Pearson.

Deere, D. U., & Patton, F. D. (1971). *Slope stability in residual soils*. Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, 87–170.

Dearman, W. R. (1991). *Engineering geological mapping*. Butterworth-Heinemann.

FHWA. (2005). *Drilled shafts: Construction procedures and LRFD design methods* (FHWA-NHI-10-016). Federal Highway Administration.

Grindheim, B., Aasbø, K. S., Høien, A. H., & Li, C. (2022). Small block model tests for the behavior of a blocky rock mass under a concentrated rock anchor load. *Geotechnical and Geological Engineering, 40*(8), 4045–4064. https://doi.org/10.1007/s10706-022-02128-1

Haberfield, C., & Lochaden, M. (2018). Analysis and design of axially loaded piles in rock. *Australian Geomechanics, 53*(1), 55–72.

Hilti. (2020). *HIT-RE 500 V3: Technical data sheet*. Hilti Corporation. https://www.hilti.com

Hilti. (2021). *HIT-RE 500 V3 epoxy anchoring system – Technical data*. Hilti Corporation. https://www.hilti.com

Hilti. (2025). *Hilti Group: Soluciones en construcción y anclajes estructurales*. Hilti Corporation. https://www.hilti.com

Hilti Corporation. (2018). *HIT-RE 500 V3 adhesive anchor – Installation instructions*. Hilti. https://www.buildsite.com/pdf/hilti/HIT-RE-500-V3-Adhesive-Anchor-Installation-Instructions-2196534.pdf

Hilti Corporation. (2025). *Company profile*. Hilti. https://www.hilti.group/content/hilti/CP/XX/en/company/corporate-information/company-profile.html

NSR-10. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*. República de Colombia, Ministerio de Vivienda.

Tomlinson, M., & Woodward, J. (2015). *Pile design and construction practice* (6th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18395

Anexos

Anexo 1. Póster.

Figura 27
Póster

