

IMPLICACIONES DE CIMENTACIONES PROFUNDAS CONSTRUIDAS EN ESTRATOS ROCOSOS, CASO DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

Gina Marcela Corredor Alarcón, Octavo semestre.

Universidad La Gran Colombia, Colombia, ginamarcelacorredor@ulagracolombia.edu.co

Mentor: Ing. Mateo Gutiérrez González, MSc en Ingeniería - Estructuras

Universidad La Gran Colombia, Colombia, mateo.gutierrez@ugc.edu.co

Resumen– En la actualidad se evidencian múltiples tecnologías para la construcción de obras civiles a nivel mundial, implementando desde la etapa de cimentación procesos de punta que no solo brindan productos de calidad, sino que también permiten mejorar y optimizar los procesos de excavación y de construcción de los elementos estructurales. Se puede destacar por ejemplo la perforación de estratos rocosos que permiten alcanzar las profundidades deseadas, cuando el suelo del terreno resulta diferente a los estratos evaluados y establecidos en un previo estudio de suelos. Sin embargo, uno de los principales problemas radica en las implicaciones que tiene seguir un diseño bajo condiciones distintas a las inicialmente establecidas, pues es posible que el estrato rocoso pierda progresivamente sus excelentes propiedades físicas y mecánicas trayendo consigo implicaciones que comprometan la seguridad de las estructuras construidas. Por esta razón, el presente documento expone algunas de las consecuencias que se pueden presentar al fracturar el estrato rocoso que no se tenía contemplado en el estudio de suelos inicial y como se alteran o modifican las propiedades de la roca y la cimentación construida.

Abstract– Nowadays multiple technologies are demonstrated for the construction of civil works globally implemented since the foundation stage processes tip that not only provide quality products, but also can improve and optimize the process of excavation and construction structural elements. You can highlight eg drilling rock strata that achieve the desired depths, when the terrain is different soil strata evaluated and established in a previous study of soils. However, one major problem lies in the implications follow a design under different conditions than those initially established, it is possible that the rock strata gradually lose its excellent physical and mechanical properties bringing implications that jeopardize the safety of structures constructed. For this reason, this paper sets out some of the consequences that may occur to fracture the rock strata that are not covered in the study had initial soils and as alter or modify the properties of the rock and foundation built.

Palabras claves– Cimentaciones profundas, muro Milán, propiedades, estrato rocoso.

I. INTRODUCCIÓN

Evidenciando la gran importancia de los apoyos de una estructura, su correcta elección al momento de diseñarla y por

otro lado la actual y común problemática del incorrecto trabajo de las fundaciones en los distintos tipos de suelo, especialmente cuando se encuentran estratos rocosos durante su etapa constructiva, hacen necesario un estudio detallado para evaluar puntos relevantes que influyen en el trabajo suelo-cimiento y por supuesto tecnologías de punta que se implementan a diario en los procesos constructivos para alcanzar las propiedades que una estructura como esta requiere para su correcto funcionamiento, a partir de la investigación.

Por lo anterior, se debe tener como precedente que toda obra civil se encuentra apoyada sobre suelo, el cual cuenta con propiedades mecánicas distintas a las que pudiera tener cualquier estructura, como por ejemplo menor resistencia, menor rigidez y mayor deformabilidad, haciendo indispensable el diseño de soportes subterráneos que toleren las cargas que puedan generar las estructuras que se encuentran sobre ellas, transmitiendo de una correcta forma las fuerzas que se puedan derivar de la superestructura [1].

De esta forma, se podría pretender que un incorrecto trabajo de las cimentaciones profundas se puede presentar en cualquier tipo de suelo, sin embargo el presente artículo se enfoca principalmente en lugares con terrenos distintos a los que generalmente se hallan en una misma región, como ocurre en el Distrito Capital de Colombia pues si bien es cierto, en Bogotá se encuentran generalmente estratos arcillosos, pues se considera que los depósitos de arcilla son a causa de un antiguo lago posicionado en la ciudad con una alta presencia de suelos orgánicos y arenosos, en donde actualmente se encuentran rocas a grandes profundidades, no obstante, paralelamente se hallan sectores con roca no muy lejanas a la superficie (suelos que se consideran atípicos a los generalmente hallados), situación que en repetidas oportunidades se convierte en una gran dificultad no solo para construir la cimentación como tal, sino que también en algunos casos impide el correcto funcionamiento como estructura de soporte.

II. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y LA ROCA

A. El suelo.

Entendiéndose el suelo como un conjunto de partículas con ciertas características y propiedades que varían considerablemente al aumentar la profundidad a la que se encuentra, se hace necesario resaltar la importancia de los estratos que se derivan de cierto lineamiento de suelo, porciones que se pueden caracterizar por sus condiciones físico-químicas y sus propiedades respectivas [2].

Cabe aclarar que para definir las características de cualquier parte de suelo, se deben tener en cuenta aspectos como el nivel de rigidez, dilatación, la resistencia al corte, entre otras, dentro de las cuales se debe realizar un gran énfasis en una de las características que en su mayoría de veces puede dar una amplia idea de las propiedades y el comportamiento del suelo, se trata del tamaño del grano; es esta característica la que determina si el suelo se compone de gravas (material granular grueso) o arenas (material más fino), En la tabla I se pueden establecer las diferencias entre un suelo y otro de acuerdo al tamaño de las partículas.

TABLA I
CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Tipo de suelo	Mín.	Máx.
Arcilla		0.002 mm
Limo	0.002 mm	0.063 mm
Arena	0.063 mm	2 mm
Grava	2 mm	63 mm

Cada estrato de suelo, comúnmente llamado horizonte, se encuentra entre la roca madre y la superficie y tienen ciertas características importantes que hacen de su comportamiento, un material distinto a las otras porciones de suelo, de esta forma a las arenas, gravas, arcillas y limos se les asignan diferentes características y propiedades.

Estas propiedades mecánicas son las que principalmente definen el diseño de la obra civil, en este caso de la cimentación; dentro de las principales propiedades índices y mecánicas se pueden resaltar la velocidad a la cual se mueve el agua a través del suelo (permeabilidad), la fuerza que mantiene unidas las partículas del suelo (cohesión), la densidad o peso específico, la fricción interna que se traduce en una resistencia a los esfuerzos cortantes, la resistencia a la compresión confinada entre otras.

TABLA II
CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Tipo de suelo	Ángulo de fricción interna (Φ)	Densidad (kg/cm^3)
Arena gruesa	40-35	2250-1450
Arena media	40-30	2080-1450
Arcilla limosa	15	1440-1920
Arcilla	0,1	1440-192

En la tabla II, se puede apreciar como varían notablemente los valores de la densidad y del ángulo de fricción interna, parámetros que determinan un comportamiento distinto incluso al estar sometidos a una misma condición de carga. He aquí la importancia de conocer el suelo que soporta las futuras estructuras y que trabaja conjuntamente con las cimentaciones apoyadas muchas veces en la roca madre.

B. La roca.

Las rocas están compuestas principalmente por minerales y por sólidos que la hacen un material resistente y compacto. Éstas al igual que los suelos, están determinadas por ciertas propiedades índices que las caracterizan, tal es el caso de la porosidad (Ver tabla III), la cual se encuentra íntimamente ligada a la resistencia a los esfuerzos cortantes, teniendo porosidades de tipo absoluto o de fisura; un alto contenido de agua, por su parte, disminuye la resistencia propia de la roca.

TABLA III
PORCENTAJE DE POROSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGUA EN LAS ROCAS

Rocas	Porosidad (%)	Absorción de agua (%)
Granitos	3,98	1,55
	1,11	0,44
	0,44	0,2
Andesitas	10,77	4,86
	0,72	0,28
	0,1	0,05
Calizas	4,36	1,73
	1,7	0,65
	0,27	0,12
Arenisca	1,62	0,66
	9,25	4,12
	26,4	13,8
Gneis	2,24	0,84
	0,78	0,3
Mármol	2,02	0,77
	0,62	0,23

Una característica adicional es la sensibilidad de este material, la cual se mide al analizar las variaciones en su permeabilidad al crear o cerrar fisuras, sin embargo como en el caso de los diferentes tipos de suelo, son las propiedades mecánicas las que determinan el diseño de la infraestructura de cimentación.

La roca por su parte se encuentra ampliamente afectada y marcada por factores como la deformación, la capacidad portante y quizás una de las más importantes, la permeabilidad. Por ejemplo, la resistencia o capacidad del macizo rocoso responderá muy especialmente a las propiedades propias del mineral que lo forman.

TABLA IV
CLASIFICACIÓN DE ROCAS SEGÚN RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Descripción	Resistencia a compresión simple	
	MPa	Kg/cm ²
Resistencia muy alta	>225	>2250
Resistencia alta	112-225	1120-2250
Resistencia media	56-112	560-1120
Resistencia baja	28-56	280-560
Resistencia muy baja	<28	<280

Las deformaciones por su parte clasifican a la roca en frágil, dúctil o plástica, dependiendo de su comportamiento al ser sometida a esfuerzos, su reacción para el primer caso será la fractura, en el segundo una deformación plástica y en el último una deformación considerable antes de la ruptura. Muy relacionada se encuentra aquella deformación producto de esfuerzos durante un periodo de tiempo considerable (fluencia) la cual se da en una secuencia: una deformación elástica, una fluencia primaria, una fluencia secundaria con una velocidad de deformación constante, una deformación terciaria con una deformación en aumento y finalmente presenta ruptura como se muestra en la gráfica.

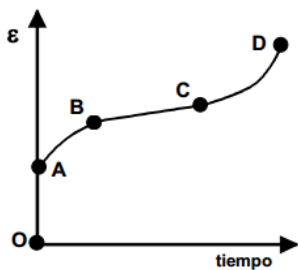


Fig. 1 Fluencia de una roca [3]

III. CARACTERÍSTICAS DE LA CIMENTACIÓN.

A. Principales estructuras de cimentación.

Como se mencionó en la introducción, toda obra civil debe soportarse sobre un terreno estable y adecuado, para ello es necesario implementar estructuras subterráneas que transfieran y distribuyan las cargas al suelo con el fin principal de que el terreno no falle al recibir puntualmente la carga, pues como se mencionó con anterioridad el suelo en sus condiciones originales o naturales presenta una amplia deformabilidad y una baja resistencia, en la mayoría de los

casos; aquellas estructuras capaces de soportar y transmitir estas cargas de forma adecuada son las cimentaciones [4]. Generalizando un poco, se podrían clasificar principalmente en dos tipos, las superficiales y profundas (de las que se ocupa el presente artículo) las cuales se caracterizan por tener una profundidad ocho veces mayor a su diámetro o espesor; a su vez, este último tipo de cimentación se deriva en un sin número de posibilidades que permiten brindar diferentes soluciones a las necesidades de las superestructuras; se podría resaltar dentro de las principales a las siguientes:

1) *Pilotes*: elemento con gran esbeltez y con una considerable capacidad de soportar fuerzas axiales y cortantes. El tipo de pilote a diseñar y construir depende generalmente del nivel freático en el terreno, las cargas a las que se verá sometida el elemento y por supuesto a las condiciones propias del suelo.

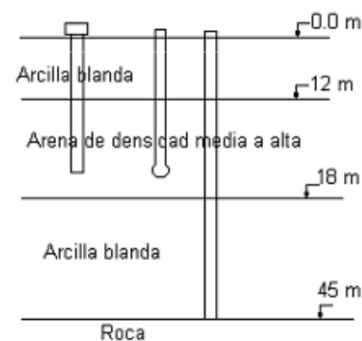


Fig. 2 Pilotes [5]

2) *Micropilotes*: perforación con diámetro pequeño que generalmente se implementa para el recalce de cimientos que han sufrido asentamientos considerables.

3) *Tablestacas*: pantallas de cimentación cuya función principal es la impermeabilización, contención y protección de obras civiles.

Los anteriores tipos son los más usados comúnmente, sin embargo para el presente artículo se resaltan las pantallas o muros, los cuales a su vez se podrían subdividir en perimetrales (muro Milán o diafragma) o internos (barretes o muro pila), los cuales cuentan con un muro guía o brocal doble (con un concreto básico de 210 kg/cm² a cerca de 1,20m), que se construye con el fin de guiar la almeja durante el proceso de excavación. Finalmente una vez se llega a la profundidad deseada, se posiciona la estructura de acero y se funde el elemento; muchas veces se consideran estos elementos como obras de contención y de apoyo significativo de las cimentaciones, sin embargo estos hace parte integral de esta última actividad, teniendo como plus diferentes aplicaciones en las obras civiles como es el caso de los sótanos, túneles y diferentes estructuras subterráneas, lo que se traduce en elementos “a la vista” que no solo cumplen la función de

transmitir las cargas de las estructuras al suelo sino que paralelamente actúan como una obra de contención de masa de suelo.

Para poder tomar como opción de cimentación este tipo de estructura, es muy importante tener presente las reacciones del terreno ante la excavación del elemento, el cual se ejecuta por módulos o tramos, ya que muchas veces el efecto de excavación provoca socavaciones relevantes que afectan considerablemente la transferencia de cargas al suelo; factores como el posicionamiento del nivel freático, el tiempo de ejecución del elemento, el tipo de suelo, la herramienta de excavación, los empujes del suelo sobre el muro, entre otros, son algunos de los aspectos más relevantes que deben ser tenidos cuenta de acuerdo a la funcionalidad del cimiento se refiere.

B. Trabajo suelo-cimiento.

Todas las características antes mencionadas tanto de los suelos como de las rocas, tienen una importante función en la infraestructura, pues son estas propiedades las que condicionan el diseño de la cimentación, cualquiera que sea su tipo. Uno de los trabajos más complejos se concentra desde que se concibe la excavación de la cimentación. Para el caso del muro Milán, esta condición transforma el estado de esfuerzos inicial del suelo, modificando de esta forma su fase inicial, es por ello que el diseño de este tipo de cimentación se hace por medio de iteraciones para obtener las dimensiones y profundidades óptimas que permitan soportar las condiciones propias del suelo y de la estructura que soportará (con sus cargas respectivas); dentro de este análisis es importante tener en cuenta aspectos como el peso del elemento subterráneo, la posición del nivel freático, los empujes y el peso del suelo que rodeará el elemento, los efectos sísmicos, entre otros. Quizás uno de los factores más decisivos sobre el diseño y el trabajo entre el suelo y la cimentación son los empujes (K).

Sin embargo, es necesario tener algunas consideraciones adicionales cuando se va a realizar una cimentación sobre un estrato rocoso. Entendiendo la roca propiamente como un material geológico y más aún suelo expuesto a diferentes grados de presión, temperatura y diversos tipos de procesos químicos y físicos, la roca cuenta con una estructura atómica y química determinada y definida [6] que la hace un material complejo de trabajar conjuntamente con el cimiento, en algunos casos.

Si bien es cierto, en muchos lugares alrededor del mundo, se considera la roca como un material natural con propiedades mecánicas lo suficientemente buenas para cimentar sobre ellas cualquier tipo de estructura, pues son los estratos rocosos aquellos que aportan en la mayoría de los casos una resistencia favorable para soportar las cargas producidas por las estructuras una vez son transmitidas por la cimentación respectiva, sin embargo se encuentran varios casos en el mundo en donde se halla roca muy cerca de la superficie, y en

donde muchas veces un afloramiento rocoso resulta ser inconveniente e inoportuno al momento de diseñar y construir la cimentación, pues se requiere de maquinaria y herramienta especial para excavar sobre un estrato resistente a varios metros de profundidad, en algunos casos, dependiente del diseño y las condiciones críticas establecidas. En la mayoría de los casos, cimentar sobre roca trae múltiples beneficios dentro de los cuales se debe resaltar la carencia de asentamientos al momento de diseñar la cimentación respectiva, pues como se mencionó al inicio del artículo las rocas presentan propiedades mecánicas importantes como lo es su rigidez que hace que los asentamientos tengan un valor casi nulo, los desplazamientos elásticos son prácticamente despreciables y las fallas por esfuerzos cortantes son muy poco probables. Caso contrario se da en presencia de arcillas o limos. Sin embargo a pesar de los múltiples beneficios que brinda cimentar sobre un estrato rocoso, se tienen algunos problemas que a grandes rasgos se pueden enumerar en fracturas, fisuras, grietas e inconvenientes en el rozamiento o fricción con la roca que rodea el cimiento. Es bien conocido, que los cimientos profundos, generan una alta presión sobre la superficie que rodea al elemento estructural, ejerciendo elevados esfuerzos sobre el material que recibe la carga de la estructura, en este caso la roca en la que se cimienta. Es por ello que al momento de cimentar sobre un estrato rocoso, es necesario tener presente principalmente la resistencia de la roca que conforma el estrato para lo cual se realizan pruebas de compresión simple o ensayos triaxiales [7] de los cuales se pueden determinar distintas propiedades, algunas de ellas mencionadas con anterioridad.

IV. CASO DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

De acuerdo al plano de microzonificación sísmica, se muestra que en el Distrito Capital se cuenta con un alto porcentaje de arcillas de alta plasticidad, correspondiente a suelo residual para la mayoría de la ciudad. Dentro de su clasificación, se encuentran suelos coluviales y aluviales con una matriz de arcillas limosas, lo que describe un suelo con una densidad aproximada de 1440 Kg/cm^3 , de acuerdo a las características estudiadas con anterioridad, lo que sugiere un suelo blando y cohesivo, con un estrato rocoso a grandes profundidades, lo que descarta en principio, problemas al excavar elementos de cimentación, evitando requerir herramientas especiales de perforación

Bogotá, se encuentra dividido en varias zonas [8] de las cuales el presente artículo se ocupa para el caso de estudio específico únicamente de la zona 2 denominada piedemonte; ésta zona se caracteriza por poseer formaciones rocosas con una capacidad portante considerable, sin embargo se encuentran sectores con inestabilidad debido a las altas pendientes, fuertes lluvias, presencia de agua subterráneas y mal manejo del crecimiento de la ciudad.

Para poner un claro ejemplo de cimentaciones sobre estratos rocosos, se tiene como precedente el megaproyecto de

Estación Museo Nacional, ubicado en la ciudad de Bogotá en la Carrera Décima, entre Calles 26 y 32, obra que se construyó con el fin de ser un terminal del sistema masivo de la ciudad, Transmilenio, la cual tiene por objeto conectar los buses duales que llegan de la carrera Séptima, los buses articulados de la Calle 26 y finalmente aquellos que transitan sobre la carrera Décima. Si bien se contempló una cimentación profunda basada en pantallas perimetrales y barretes con un espesor de 0,60m y una profundidad que oscila entre los 12 y 15 metros de profundidad, se esperaba encontrar estratos con limos y arcillas hasta dichas profundidades, sin embargo se hallaron rocas y turbas de gran magnitud (ver fig. 3) que impidieron la correcta ejecución del proyecto.



Fig. 3 Roca extraída a una profundidad aproximada de 5m
[Fuente: Autor].

Este caso como muchos otros alrededor del país, evidencian una clara necesidad de contar con elementos y herramientas con tecnología de punta que intervengan durante el proceso constructivo de las cimentaciones en presencia de estratos rocosos, pues muchas veces los baldes y almejas utilizadas para realizar la labor de excavación, no es el accesorio o la herramienta más adecuada para enfrentarse a este tipo de estratos, ya que se pueden presentar daños considerables en los equipos, y herramientas como las almejas en donde se ven reflejadas las pérdida y rotura de los dientes de la cuchara tal como puede apreciarse en la figura 4.



Fig. 4 Daño de dientes en almeja de excavación.
[Fuente: Autor]

Dentro de las herramientas más relevantes para combatir este tipo de bolos se pueden destacar el trépano como elemento hecho para la trituración de la roca insitu, las brocas, el hammer, o los martillos de impacto que se ven asociados a actividades de cimentación en estratos rocosos, los cuales se encuentran caracterizados por su energía potencial o nominal [9], que por su funcionamiento, se asimilan al del trépano el cual trabaja por golpeteo o caída libre.

En este proyecto también se puede mencionar que los estratos de suelo encontrados en la excavación de los elementos de cimentación, presentaron una muy corta continuidad, reconociendo inicialmente arenas con presencia de materiales granulares, arcillas y arenas de diferentes tamaños con contenidos finos y en algunos casos materia orgánica, seguido por una arcilla limosa, a la que se le podría otorgar una humedad, plasticidad y consistencia media. En algunos casos, grava arenisca de tamaño medio con limo arcilloso arenoso que finalmente le daba pasó a cantos y bolos de gran tamaño que evidenciaban la presencia de roca.

Realizando un detalle general de algunas de las condiciones que se vieron afectadas al encontrar en terreno un suelo distinto al planteado en el inicial estudio de suelos, en este caso de estudio, particularmente con una alta presencia de bolos y rocas a bajas profundidades, se pueden destacar las siguientes:

1) Las almejas utilizadas al iniciar el proyecto (cuchara STEIN de 600mm) se vieron afectadas en repetidas oportunidades, como se evidenció anteriormente (ver Fig. 4).

2) Fue necesario el uso continuo de trépano para impactar y triturar la roca que se hacía presente en la mayoría de los módulos de pantalla. El impacto de esta herramienta con la roca, no solo pudo causar cambios drásticos en las propiedades físicas y químicas en la roca, sino que también produjo repercusiones en la plataforma de trabajo, evidenciándose asentamientos considerables que no garantizaban la seguridad necesaria para el posicionamiento de los equipos e incluso del personal. Adicionalmente se presentó afectación en las vías aledañas al proyecto (Carreras Séptima y Décima, entre Calles 26 y 32) a causa de las vibraciones e impactos generados por el constante golpeteo.

3) Como consecuencia del constante uso del trépano se pudieron notar constantes desprendimientos de material, que se depositaban en la propia excavación, lo que provocó durante el proceso de ejecución, socavaciones considerables que retrasaban la cimentación; generalmente se ejecutaba un módulo de pantalla en un día, sin embargo por presencia de rocas como las enseñadas en la Fig. 3, la excavación de un elemento de condiciones similares (14m de profundidad aproximadamente) podría tardar incluso una semana. Finalmente, se hacía indispensable llenar la excavación que se dejaba iniciada para continuar al día siguiente, con relleno fluido, un mortero de características básicas con una resistencia mínima 10kg/cm² y un asentamiento de 9” (23 cm), material que no se tenía contemplado, por las características distintas que se presentaban en el estudio de suelos y que aumentaba aún más los costos de la obra, no solo por el transporte y traslado de nuevas herramientas para atravesar la roca, sino también costos adicionales en suministros, como el caso del relleno fluido que presenta un

costo similar al concreto con resistencia superior (convencional 210 kg/cm², grava común (1”) y asentamiento de 6” o 5”).

4) Se presentó un alto consumo de agua y bentonita (lodo bentonítico) con el objetivo de estabilizar el terreno durante la excavación de los elementos, ya que por tratarse de un pequeño estrato de arcillas limosas y posteriormente de roca triturada se desestabilizaba constantemente el suelo, provocando desprendimiento de partículas que generaban socavaciones importantes.

5) En algunos elementos se vieron considerables problemas de verticalidad en los módulos de pantalla o barretes internos. A pesar de que el brocal cumplía su función de guiar la almeja durante el proceso de excavación, las grandes socavaciones inducían desviaciones importantes en la cuchara al momento de realizar las mordidas a las que hubiera lugar para excavar el elemento respectivo.

6) A causa de las socavaciones mencionadas anteriormente, se presentó un considerable sobreconsumo de concreto; en obras cercanas de cimentación bajo condiciones similares de diseño, más específicamente en la cimentación de los puentes de la Avenida Caracas, Carrera 13, Carrera 7 y Carrera Tercera, se presentaron expansiones en el consumo de concreto de aproximadamente 10%, sin embargo en el presente caso de estudio, Estación Museo Nacional, se evidenciaron sobre volúmenes superiores al 50%, lo que sin duda alguna causaron alzas en los costos de los módulos de pantalla por un alto consumo de concreto (Tremie 280 kg/cm², grava de 1” y asentamiento de 6”).

7) Los rendimientos de los equipos y por consiguiente de la producción, se vieron altamente afectados por los tiempos “perdidos” en cambio de dientes para las almejas, constantes cambios entre trépano para impactar la roca y almeja para extraerla. Rendimientos que posteriormente se vieron traducidos en incumplimientos con los plazos pactados inicialmente, lo que retardó considerablemente la entrega del proyecto.

Finalmente y una de las consecuencias más importantes para el trabajo de la pantalla perimetral y de los barretes internos, fue la adición de un nuevo diseño de cimentación para su correcto funcionamiento. Dado que en algunas ocasiones elementos diseñados a una profundidad de 12m a 14m quedaban hormigonados a 10m e incluso 6m, se hizo indispensable agregar al diseño de Muro Milán y Barretes internos, algunos pilotes con el fin de trabajar en conjunto y brindar un mayor y mejor soporte que compensara los elementos que no se pudieron llevar a cabo de acuerdo al diseño preliminar. Adicionando a los 250 módulos de pantalla (aproximadamente) un grupo de 10 pilotes a profundidades mayores (entre 15m y 20m), sin embargo por la misma presencia de turbas y bolos de grandes tamaños, se utilizaron herramientas como baldes roqueros y hammer que cumplieran la misma función de impacto contra la roca, para posteriormente ser extraída por los baldes respectivos.

V. CONCLUSIONES

Como conclusión general y principal se resalta la importancia de los estudios de suelos para cualquier tipo de construcción civil, pues de este se toman distintas determinaciones que afectarán de manera directa el proyecto a ejecutar, en el caso de las cimentaciones, el estudio de suelos presenta un valor agregado, pues de él dependerá contundentemente el diseño y trabajo de la cimentación a construir. Tal como se mostró en el caso de estudio, un cambio drástico entre las características y propiedades del material que se encuentra en el estudio de suelos y el que se encuentra en terreno, puede ser causante de problemas durante la ejecución del proyecto y durante su trabajo como elemento de cimentación, provocando asentamientos considerables y/o disminución en sus propiedades físicas al momento de transmitir las cargas al suelo.

Por otra parte se podría deducir que la roca encontrada durante la excavación del proyecto al ser fracturada esta sufrirá una contundente disminución en su capacidad de apoyo, pues estas herramientas que trituran la roca madre por impacto, como el trépano, podrían generar grietas o fisuras permanentes que fisuren también la roca, aumentando el estado de esfuerzos del suelo y quizás provocando desplazamientos o asentamientos diferenciales que interrumpan el correcto trabajo de la cimentación con el suelo y la propia roca.

Adicionalmente la alteración de una roca por la excavación de un cimiento puede ser un potencial generador de incrementos de porosidad, principalmente de fisuración, lo que podría producir un aumento en la absorción de agua y por ende una disminución en su capacidad portante, como se mencionó anteriormente. También es importante resaltar que el uso de herramientas como el trépano los baldes roqueros y cualquier otro tipo de herramienta de impacto que se utilice para triturar la roca y así alcanzar las profundidades deseadas, puede ser un generador potencial de grandes socavaciones en el terreno que se esté tratando, ocasionando de esta forma una mayor inversión de tiempo durante la excavación de un elemento y sobre consumos de concreto lo que se traduce en impactos económicos que posteriormente se verán reflejados en incremento de costos de una obra de cimentación.

Por otro lado las estructuras de cimentación como los pilotes, barretes y pantallas pueden aportar asombrosos soportes a los edificios, vías o demás construcciones civiles que se construyan; son las rocas aquellas que se encargan de darles un valor agregado si se manejan de forma correcta y adecuada, pues un error en el estudio de suelos, en procesos constructivos o en diseños geotécnicos o estructurales puede ser catastrófico para las estructuras, evidenciándose que por más resistente que sea la roca madre, esta podría presentar fisuras, grietas, desplazamientos, asentamientos y múltiples problemas en sus propiedades mecánicas que reducirían considerablemente los beneficios de la cimentación, de la roca

misma y de las edificaciones que soporta, disminuyendo su seguridad y la integridad del sistema estructural. Si bien se tratara de una roca de una resistencia alta (112-225 MPa de capacidad portante) ésta podría disminuir notoriamente su resistencia a raíz de golpeteo por impacto con herramientas como el trépano para fisurar la roca, extraerla y llevar el muro pantalla a la profundidad de diseño.

Cabe resaltar que por el rápido cambio de estratos presentado en el caso de estudio (por tratarse de pequeñas capas de suelo, en los primeros metros de profundidad) pueden haberse generado algunas variaciones en la presión horizontal activa de tierras.

Finalmente se puede concluir que un correcto y adecuado manejo de las herramientas necesarias para la ejecución de la cimentación, puede llevar a construir obras de gran magnitud, teniendo como buen aliado el estrato rocoso que se encuentre en la zona de construcción, implementando distintos diseños de cimentación, mezclando elementos como los módulos de pantalla del Muro Milán, con Barretes Internos e incluso pilotes, con el fin de que trabajen conjuntamente para brindar un mejor y mayor soporte durante la transmisión de cargas al suelo.

VI. REFERENCIAS

- [1] MONTROYA, Javier y PINTO, Francisco. Cimentaciones. Mérida: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica, 2010. 34p.
- [2] GERSHUNY, Grace. Start With the Soil. USA, 2013. 205p
- [3] DON DOTSON, P.E. A Creative Solution to Problems with Foundation Construction in Karst. Huntsville, Alabama: 2013.
- [4] AYSEN, A. Soil Mechanics. Basic Concepts and Engineering Applications. London: Taylor & Francis Group, 2005. 457p. ISBN 0 415 38393 5.
- [5] CANOBA, Carlos y FRAGA, Hector. Propiedades elásticas de las Rocas.
- [6] FARMER, William. Engineering Properties of Rocks. Londres: E&F.N. SPON Ltd., 2014. Chapter 3.
- [7] JUÁREZ, Eulalio y RICO, Alfonso. Mecánica de suelos: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos, Tomo II. México D.C.: Editorial Limusa S.A., 2004. 427p. ISBN 968-18-0128-8.
- [8] COLOMBIA, ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Decreto 523 (15 Dic 2010) Por el cual se adopta la Microzonificación sísmica de Bogotá D.C. Bogotá D.C.
- [9] Design and Construction of Driven Pile Foundations—Lessons Learned on the Central Artery/Tunnel Project. United States. Junio, 2006. Publicación No. FHWA-HRT-05-159
- [10] AYSEN, A. Soil Mechanics. Basic Concepts and Engineering Applications. London: Taylor & Francis Group, 2005. 457p. ISBN 0 415 38393 5.
- [11] CAI, Meifeng y WANG Jin'an. Boundaries of rock mechanics: Recent Advances and Challenges for the 21st Century. London: Taylor & Francis Group, 2008. 986p. ISBN 978-0-415-46934-0.
- [12] CRESPO, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. 6ta ed. México: Editorial Limusa S.A., 2007. 646p. ISBN 978-968-18-6963-2.
- [13] DOMINGUEZ, Miguel. General de mecánica de suelos y rocas del predio ubicado en ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua. Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2013.
- [14] FENG, Xia-Ting y HUDSON John. Rock engineering design. London: Taylor & Francis Group, 2011. 468p. ISBN 978-0-415-60356-0.
- [15] Foundation design for the Burj Dubai – The World’s Tallest Building. Arlington: Agosto de 2008.
- [16] GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE. Foundation design and construction. Hong Kong: 2006. GEO PUBLICATION No. 1/2006.
- [17] GERSHUNY, Grace. Start With the Soil. USA, 2013. 205p.
- [18] JUÁREZ, Eulalio y RICO, Alfonso. Mecánica de suelos: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos, Tomo II. México D.C.: Editorial Limusa S.A., 2004. 427p. ISBN 968-18-0128-8.
- [19] OCHOA, Jorge. Elaboración del anteproyecto de obras generales y secundarias del proyecto de ampliación y mejoramiento de los sistemas de agua potable y alcantarillado para el esquema San Pedro – Distrito de Carabayllo.
- [20] PACHECO, Jorge. Criterios que influyen en el dimensionamiento de cimientos. En: Ingeniería Revista Académica. Septiembre-Octubre, 2004. Vol. 8, No. 003. Pág 27.
- [21] RAMIREZ, Pedro y MONGUE, Leandro. Mecánica de Rocas: Fundamento e ingeniería de taludes.
- [22] RAMÍREZ PACHECO, Ricardo Antonio, SANTOS CELADA, Miguel Ángel y SOSA RIVERA, Luis Antonio. Procesos constructivos aplicados a cimentaciones profundas en el Salvador. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Ciudad Universitaria: Universidad del Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil, 2004. 74 p.
- [23] ROJAS, Silvio. Tipos de Pilotes. Merida: Universidad de los Andes, Merida Venezuela, 2014. 63p.
- [24] STAG, A.G. y OLGIERD, Zienkiewicz. Mecánica de rocas en la ingeniería práctica. Madrid: Editorial Hermann Blume, 1970. 398p. ISBN 9788472140172.
- [25] SURSANOV, D y SYTCHKINA, E. Problems of building and designing on semi-rocky soil.
- [26] TANG, Chun'an y HUDSON, John. Rock Failure Mechanisms: Explained and Illustrated. London: Taylor & Francis Group, 2010. 322p. ISBN 978-0-415-49851-7.
- [27] US ARMY CORP OF ENGINEERS. Technical instructions: Design of Deep Foundations. Washington: Headquarters, 1998. 192p.
- [28] VERRUIJT, Arnold. Soil mechanics. Delft: Felft University of Tchonology, 2001.