

Diseño y construcción de una excavación a 50m de profundidad en la zona urbana de la Ciudad de México, mediante la técnica constructiva “Top Down”, para alojar 16 sótanos de estacionamiento.

Gabriel LIRA ALVAREZ,^{a,1} Guillermo CLAVELLINA MILLER^a Uriel HERRERA GOMEZ^a

^a*Cimentaciones Mexicanas S.A de C.V.*

Resumen. El proyecto que se describe en este documento se localiza en uno de los corredores financieros y comerciales más importantes de la Ciudad de México, dentro de una superficie regular de aproximadamente 1350 m² y consta de 16 sótanos de estacionamiento (profundidad máxima de excavación de 50 m) y 15 niveles en superestructura. Dada la presencia de agua intersticial, una profundidad de excavación aproximada de 50m y una superficie limitada de trabajo, además del contexto urbano complicado, se definió un sistema de estabilización a base de muro diafragma estructural, definitivo de 60 cm de espesor, desplantado a 53 m de profundidad, empleando las losas de planta baja y sótanos como diafragmas horizontales. Para el proceso constructivo “top-down” fue necesaria la construcción de elementos de pre-cimentación (perfiles metálicos) para el soporte preliminar de las losas. El documento puntualiza sobre las características y diseño de los elementos principales del sistema y los retos constructivos que se enfrentaron.

Palabras clave: top down, excavación profunda, sótanos, diseño, construcción

1. Introducción

El desarrollo inmobiliario en las grandes urbes, como la Ciudad de México, ha impuesto nuevos retos a la ingeniería geotécnica y estructural. Los proyectos recientes se desarrollan en predios de geometrías complejas, incluso algunos, resultado de la fusión de varios lotes; los conceptos arquitectónicos modernos demandan estructuraciones complejas que maximicen los espacios rentables y ello deriva en cargas de diseño de magnitud importante, aunado a la necesidad de alcanzar mayores profundidades de excavación para alojar áreas de estacionamiento para los usuarios. El proyecto que nos ocupa se localiza sobre avenida de los Insurgentes, uno de los corredores financieros y comerciales más importantes de la Ciudad de México, en las inmediaciones de World Trade Center (WTC) en uno de los barrios de mayor plusvalía, la colonia Nápoles -ver Figura 1-.

¹ Ingeniero de Proyecto, Departamento de Ingeniería, Cimentaciones Mexicanas S.A de C.V, Av. Paseo de la Reforma no. 300 piso 13, Ciudad de México, México; E-mail: lira.gabriel@cimesa.net.

El reto principal que demandó este proyecto fue la realización de una excavación a 50 m de profundidad dentro de un predio muy limitado y en un entorno urbano poco favorable.



Figura 1. Ubicación del proyecto.

1.1 Descripción general del proyecto

El proyecto considera la construcción de un inmueble para uso de oficinas de 15 niveles a partir del nivel de banqueta, empleando estructura metálica para su edificación y 16 sótanos de estacionamiento en estructura de concreto empleando las mismas losas para generar el flujo de circulación (losas en rampa). El predio es de forma rectangular de aproximadamente 29 m de frente y 47 de fondo; el único acceso al predio es por avenida Insurgentes y en las colindancias se tienen presencia de edificios de 2 a 12 niveles sobre el nivel de banqueta -ver figura 2-.

El procedimiento constructivo propuesto para la realización de la excavación y de los sótanos de estacionamiento, es mediante la técnica “top-down” la cual, a grandes rasgos, consiste en construir una primera losa (comúnmente la losa de planta baja) la cual se empleará como plataforma de trabajo y deberá diseñarse para soportar el peso y tránsito de camiones y equipo pesado; posteriormente se comienza con la excavación debajo de esta losa extrayendo el material a través de ventanas de rezaga habilitadas expofeso y así construir el siguiente nivel de losa inferior; el proceso se repite secuencialmente hasta alcanzar el nivel máximo de excavación.



Figura 2. Vista en planta y perspectiva del predio y sus colindancias.

Modelo

La construcción del muro Milán en todo el perímetro es una actividad fundamental para el proceso. Para este proyecto el muro es de 60cm de espesor y será la estructura definitiva del cajón de cimentación y en conjunto con las losas de sótanos formarán el sistema de retención final.

Para poder ejecutar la técnica constructiva es preciso contar con elementos de soporte temporal de losas y para ello se emplean elementos metálicos, denominados perfiles pre-cimentados, que de forma práctica se disponen en la misma ubicación de columnas o muros de carga del proyecto también para aprovechar la construcción de los elementos de cimentación (pilas circulares o pilas rectangulares) que servirán de empotramiento y soporte de dichos perfiles.

Una vez dispuestos los elementos de cimentación e instalados los perfiles pre-cimentados se realiza la construcción de la trabe de coronamiento que es el elemento estructural que une a todos los paneles del muro en su parte superior. También se perforan y equipan los pozos de abatimiento que servirán para el desecado del agua intersticial que quedó confinada al construir el muro Milán.

Para este proyecto particular, previo a la construcción de la losa de planta baja, se realizó una excavación inicial a cielo abierto para la construcción del sótano 1 el cual es el único sótano que por proyecto está dispuesto a un mismo nivel ya que en su mayoría se empleará para alojar instalaciones y áreas de equipamiento, posteriormente se construye la losa de planta baja.

Construidos el sótano 1 y losa de planta baja, ésta última alojando toda logística de trabajo, es decir, draga de excavación, grúa de servicio, áreas de estiba de acero y zona de carga de camiones, se inició propiamente con el sistema top-down. Es importante mencionar que la secuencia que se consideró para la excavación fue en alturas dobles, esto es excavando a cada dos sótanos hasta el sótano 13 construyendo los sótanos 1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13 de forma descendente, y en altura “sencilla” hasta el sótano 16, lo anterior debido a que la altura de estos sótanos por proyecto es mayor que las anteriores con el objeto de albergar elevautos y en el último sótano la planta de tratamiento de agua y cisternas.

2. Condiciones Geotécnicas

El predio se localiza dentro de la denominada Zona de Transición o Zona II y de acuerdo a la interpretación estratigráfica, referencia [1], Estudio geotécnico, los estratos de suelo del sitio se pueden agrupar en seis unidades principales. Las unidades estratigráficas y las propiedades mecánicas consideradas para los análisis geotécnicos se presentan en la Tabla 1 mostrada a continuación:

Tabla 1. Modelo geotécnico

Unidad	Prof _{inicial} (m)	Prof _{final} (m)	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ (°)	K _s (t/m ³)
U1	0.0	3.0	1.70	5.0	15	1600
U2a	3.0	6.5	1.30	4.0	0	880
U2b	6.5	8.5	1.40	6.0	10	3000
U2c	8.5	15.5	1.30	4.0	10	2000
U3	15.5	18.5	1.50	4.5	13	5000
U4	18.5	20.5	1.80	6.0	35	1700
U5	20.5	23.0	1.75	6.0	28	4400
U6a	23.0	31.0	1.80	6.0	34	3800

U6b	31.0	35.0	1.75	7.0	28	4200
U6c	35.0	60.0	1.80	6.0	34	4500

Donde:

γ .- Peso volumétrico

ϕ, c .- Propiedades mecánicas (ángulo de fricción y cohesión)

k_s .- Módulo de reacción

U1.- Costra superficial y relleno

U2a, U2b, U2c.- Arcillas y limos arenosos

U3.- Arcillas arenosas duras

U4.- Arena arcillosa con grava

U5.- Depósitos sedimentarios de origen volcánico (Toba areno-arcillosa)

U6a, U6b and U6c.- Depósitos sedimentarios de origen volcánico (Tobas Arena arcillosa con fragmentos de roca de diámetros que van desde gravas hasta boleos)

Respecto a la presión de agua en el subsuelo, el nivel freático se identificó como un manto colgado presente de 2.5 a 16.0m de profundidad. Para los análisis de interacción suelo-estructura, la estimación de la presión de agua en la masa de suelo se realizó considerando un nivel superior a 2.0m de profundidad y una distribución con incremento hidrostático hasta 16.0m de profundidad y posteriormente con un abatimiento lineal de la presión hasta cero a 20m de profundidad, en términos prácticos una distribución piezométrica.

3. Diseño de muro Milán

Los modelos de análisis se realizaron bajo el método del módulo de reacción, el cual considera al muro Milán como una yuxtaposición de traves verticalmente solicitadas por empujes laterales de tierras (repose, activo y pasivo), sísmicos, por sobrecargas y por el empuje del agua (piezométrico de acuerdo al punto anterior), soportadas horizontalmente por las losas, considerando las distintas etapas del proceso constructivo y la historia de desplazamientos y esfuerzos que se genera.

La acción ejercida por el suelo sobre cada cara del muro Milán, es calculada teniendo en cuenta el comportamiento elasto-plástico de los suelos conforme al esquema de la Figura 3.

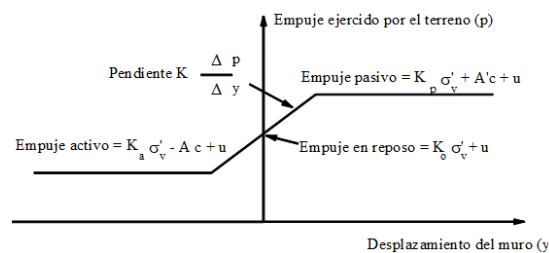


Figura 3. Condiciones de empujes en el muro

Para el cálculo de los desplazamientos laterales del muro Milán (análisis de interacción suelo-estructura ante cargas laterales), el suelo se modela a través del coeficiente de reacción “ k_s ”, el cual es un parámetro de cálculo práctico, que depende de parámetros del suelo y de la rigidez del muro. De los análisis se obtienen y revisan los siguientes resultados:

- A.- Desplazamientos horizontales en muro Milán.
- B.- Elementos mecánicos en muro.
- C.- Fuerzas axiales en las losas.

Los análisis bajo este método se realizaron empleando el programa del grupo Soletanche-Bachy llamado PARIS versión W2011k. el cual modela al suelo cumpliendo una ley de resistencia Mohr-Coulomb, empleando los parámetros de resistencia del suelo “c y ϕ ”, y para la fase elástica del suelo se define el coeficiente de rigidez o módulo de reacción “ k_s ”. Para los análisis se emplearon las propiedades mostradas en la tabla 1.

El muro Milán se modela como elemento viga con comportamiento elástico teniendo en cuenta la rigidez axial de los elementos, es decir el módulo de elasticidad de los materiales por la sección transversal del elemento (en un ancho unitario); las losas de planta baja y sótanos se modelaron como elementos viga y apoyos rígidos, respectivamente, lo anterior para tomar en cuenta la transmisión de momentos de la losa de planta baja (plataforma de trabajo, con sobrecarga de diseño de $2t/m^2$) hacia el muro así como la concentración de esfuerzos en las zonas de conexión de las losas de sótanos y el muro.

Para los análisis se consideraron sobrecargas en superficie de 12.0, 8.0, 2.0 t/m^2 en función de las estructuras vecinas o presencia de vialidad, respectivamente. Colindancia Norte. - Para esta colindancia se consideró una sobrecarga de 12.0 t/m^2 a una profundidad de 3.0m considerando que el edificio adjunto cuenta con un sótano de estacionamiento. Colindancia Sur. - Dada la presencia de una estructura menor de 2 niveles en un ancho de 10m y adjunto a ella una estructura de 8 niveles por encima de nivel de banqueta, para esta colindancia se consideró la presencia de sobrecargas en superficie de 2.0 y 8.0 t/m^2 , respectivamente. Colindancia Poniente; debido a la que en esta colindancia se encuentra la Av. Insurgentes, la sobrecarga considerada en el análisis es de 2.0 t/m^2 . Colindancia Oriente; Para esta última se encuentra adyacente a los sótanos de estacionamiento de un edificio de 12 niveles, dos niveles de sótanos en una franja de aproximadamente 9.0m y posteriormente la edificación mayor (12 niveles), de lo anterior las sobrecargas consideradas en el análisis para esta colindancia son de 3.0 y 12.0 t/m^2 . En la Figura 4, se presenta un ejemplo de las envolventes de desplazamientos, momentos flexionantes y fuerzas cortantes obtenida de los análisis de interacción suelo-estructura realizados para una de las colindancias.

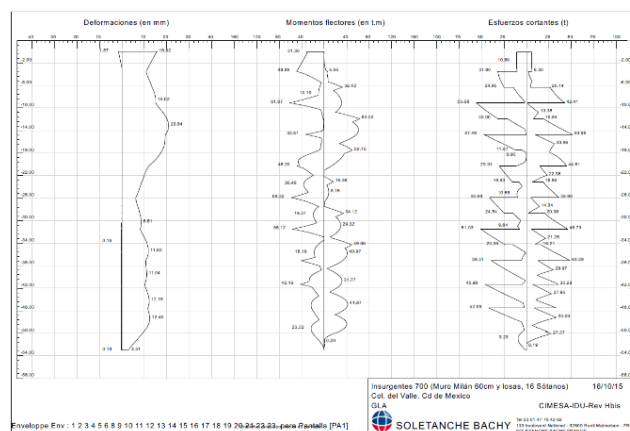


Figura 4. Envolvente de desplazamientos y elementos mecánicos, colindancia norte y sur

4. Detalles constructivos

Durante la etapa de desarrollo de ingeniería para la construcción del proyecto fue preciso estudiar con detalle la secuencia constructiva más adecuada para el proyecto y con ello definir actividades complementarias para el buen desarrollo de todo el proceso, por ejemplo, la necesidad de realizar inyecciones previas en el trazo del muro y la ubicación de pilas para minimizar el riesgo de caídos e inestabilidad del terreno, así como el diseño de elementos estructurales complementarios o la adecuación de estructuras para su uso durante la etapa constructiva.

4.1 Construcción de Muro Milán y Barrettes

Si bien la construcción de estos elementos es una práctica habitual dentro de las actividades de construcción, para este caso en específico, las dimensiones del predio convirtieron esta actividad en todo un reto debido a la logística que debió seguirse debido a las actividades de perforación de elementos, ubicación de la central de lodos, disposición de la zona de habilitado de armados, estiba de acero y estiba de perfiles.

En las Figuras 6 y 7 se aprecian la construcción de una sección de muro (panel) y de un berrette (pila rectangular), respectivamente, en donde se puede observar el poco espacio disponible en el sitio. Cabe destacar que la longitud total de los armados de muro fue 53.0m, lo cual evidentemente obligó a seccionar los armados para su colocación.



Figura 5. Construcción de sección de muro (panel)

4.2 Columnas de acero temporales (Perfiles pre-cimentados)

Es importante mencionar que los perfiles pre-cimentados son elementos adicionales cuyo uso y diseño se definen por el propio proceso constructivo, si bien no son elementos que formen parte de la estructura original, bajo ciertas condiciones puede incluirse su aporte al sistema estructural. Debido a que el empleo de la técnica top-down ha ido en aumento, el diseño de estos elementos ya forma parte del diseño inicial realizado por el estructurista; cuando esto no ocurre el diseño de estos elementos puede recaer en el desarrollador el proceso constructivo, evidentemente con la revisión y aprobación del estructurista.



Figura 6. Construcción de barretes

La revisión de los perfiles pre-cimentados, referencia [2], consiste en verificar que los perfiles metálicos no presenten falla por pandeo debido a la acción de la carga axial que actúa en los elementos metálicos esbeltos, en la longitud libre (sin restricción lateral) que se tendrá entre el nivel inferior de cada losa (considerando la existencia de un pequeño “muñón” de columna) y el nivel de excavación; lo anterior para cada secuencia de excavación y para cada tipo de perfil pre-cimentado de acuerdo a la geometría del proyecto.

Para el proyecto se emplearon 20 elementos pre-cimentados mismos que por su ubicación dentro del proyecto y su área tributaria fueron construidos mediante el desarrollo de 9 tipos de perfiles -ver Figura 7-. Para el diseño de los perfiles pre-cimentados de manera inicial se determinaron las descargas en cada perfil y por cada secuencia de excavación; para ello se definieron tanto los pesos de cada losa, tanto de planta baja (empleada como plataforma de trabajo) como de losas de sótanos, ambas para su etapa constructiva, mismas que están íntimamente ligadas a las áreas tributarias de cada elemento metálico.

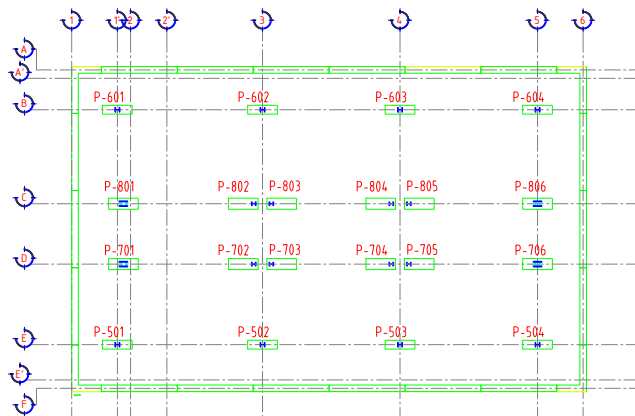


Figura 7. Distribución de perfiles pre-cimentados

Es importante mencionar que las áreas tributarias se definieron de forma geométrica afectando la superficie de forma conservadora por un factor de 1.1 lo anterior para tomar en cuenta los efectos de cambio de rigidez en las losas y que pueden generar variaciones en la distribución de la carga. La definición de los pesos de las losas se realizó de la siguiente forma:

Para la losa de planta baja se consideró un espesor como losa maciza de 40cm, un peso volumétrico de 2.4t/m^3 una carga muerta de 0.5t/m^2 y una carga viva de 1.5t/m^2 , de lo cual se obtiene un peso de 3.0 t/m^2 . Para el caso de la losa de sótanos se consideró un espesor como losa maciza de 25cm, un peso volumétrico de 2.4t/m^3 una carga muerta de 0.1t/m^2 y una carga viva de 0.1t/m^2 , de lo cual se obtiene un peso total de 0.8 t/m^2 .

Un factor importante dentro de la revisión por carga axial, es la longitud susceptible a pandeo, para el cálculo de dicha longitud se consideró que la conexión entre el perfil y el muñón-losa se genera una condición de articulación al igual que la frontera entre el perfil y el suelo, ya que el suelo no es lo suficientemente rígido para impedir el giro, asimismo el giro del perfil se genera dentro de la masa de suelo a una profundidad desconocida, y no en la frontera de corte (suelo) como pudiera pensarse; lo anterior nos indica que la longitud efectiva es mayor a la determinada considerando el nivel de excavación del suelo.

Para la determinación de la longitud susceptible a pandeo, de manera conservadora se considera que el giro del perfil se genera aproximadamente 1.0m por debajo del nivel máximo de excavación. – ver Figura 8-.

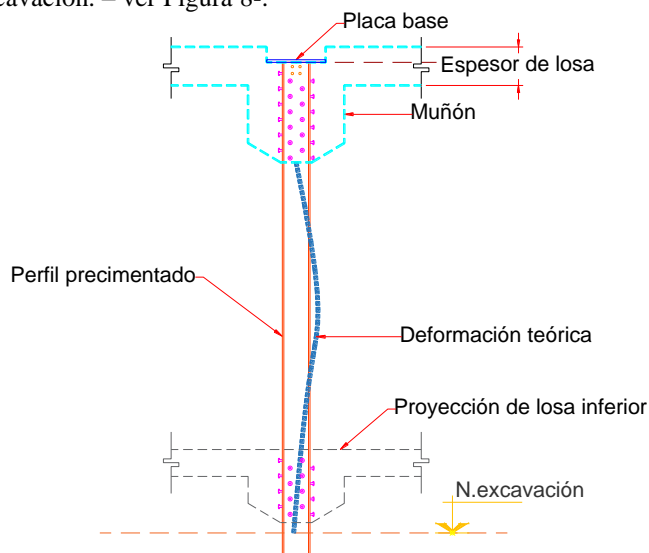


Figura 8. Determinación de la longitud de pandeo

La revisión por carga axial de los perfiles pre-cimentados se realizó por la teoría de esfuerzos permisibles, considerando que la falla que puede generarse es por pandeo del elemento alrededor del eje de menor momento de inercia de la sección (I_y), y que para el caso de los perfiles pre-cimentados tipo W es el eje Y.

4.3 Elementos de cimentación

De acuerdo con el proyecto base, la cimentación del inmueble podía resolverse mediante zapatas aisladas, lo anterior derivado de la magnitud de las descargas y las características geomecánicas del terreno de apoyo, referencia [3]. Para poder llevar a cabo el proceso constructivo en top-down se realizó una propuesta de sustitución de las zapatas por pilas cortas de sección rectangular (barretes) de $1.0 \times 2.7\text{m}$ de sección transversal y de 6.0m de longitud efectiva, prácticamente para generar la longitud suficiente para garantizar un empotramiento adecuado de los perfiles pre-cimentados.

Es importante mencionar que la elección de pilas de sección rectangular obedeció a un tema de control de verticalidad, es decir, debido a las dimensiones tan reducidas del proyecto, una pérdida de verticalidad importante impactaría en la necesidad de crecer secciones de columna y con ello tener una afectación a dimensiones de cajones de estacionamiento y/o áreas de circulación. Las pilas circulares fueron descartadas debido a que su desviación no podía ser menor al 2%, aun cuando el RCDF, referencia [4], permite para estas profundidades una desviación del orden del 3%.

La tolerancia en desviación que permitía el proyecto arquitectónico en promedio fue del 1%, y para este proyecto prácticamente en todos los elementos la desviación real se definió cercana al 0.5% -ver Figura 9-.



Figura 9. Conexión entre la barrette y el perfil pre-cimentado

4.4 Plataforma de trabajo (Planta baja)

La planta baja del proyecto se encuentra en su mayoría a la cota +1.5m y solo la primera crujía pagada a la colindancia de Insurgentes la ubicada a la cota 0.0m la cual corresponde al nivel de banquetta. Debido a que la superficie de trabajo en su mayoría se encontraba a 1.5m por encima del nivel de banquetta, fue necesario ampliar la superficie al nivel de banquetta a una segunda crujía, para generar una superficie suficiente para albergar los camiones de volteo y tener una zona de descarga de insumos a la obra. También fue necesario generar una rampa de acceso para la zona superior de la plataforma de trabajo lo cual fue posible invirtiendo la rampa de acceso al sótano 1 y reforzándola para el peso durante la etapa constructiva. Los ajustes a esta losa son temporales para el proceso constructivo y una vez concluida la construcción la losa podrá reconfigurarse a su diseño original de forma relativamente sencilla debido a que la estructuración de esta losa es mediante estructura metálica -ver Figura 10-.

Es importante mencionar que durante la construcción de la trabe de coronamiento se dejaron preparaciones para la construcción de la plataforma de trabajo, muñones de trabes metálicas, y para el desplante futuro de la superestructura, perfiles y acero de refuerzo – ver Figura 11-.



Figure 10. Vista general de la plataforma de trabajo

4.5 Excavación y losas de sótanos

Como se mencionó en el apartado del procedimiento constructivo, previo a la construcción de la losa de planta baja, se realizó una excavación inicial a cielo abierto al nivel -5.15 m para construir la losa de sótano 1, cuyo nivel es la cota -3.50m, en efecto se realizó una sobre-excavación para emplear una cimbra corta, procedimiento que se repitió en todos los casos.



Figure 11. Detalle de la preparación para superestructura

Una problemática que se previó desde la etapa de estudio fue la configuración del sistema de losas de sótanos, en síntesis, debido a la poca superficie del proyecto, las losas de sótanos cumplen la doble función de estacionamiento y rampa generando una especie de espiral con dos porciones planas a los extremos del predio en el sentido trasversal en medios niveles -ver figura 12-. La complejidad de este sistema queda evidente durante el proceso constructivo cuando se pretende realizar la construcción sólo de las losas impares (3, 5, 7, 9, 11 y 13) ya que se genera una zona de losa sin continuidad de conexión o una zona del muro sin soporte lateral, lo cual por estabilidad no era posible.

5. Conclusiones

A pesar de la superficie muy limitada del pedio (1,400 m²), mediante una adecuada logística de obra y un procedimiento constructivo conveniente, fue posible llevar a cabo la construcción de 16 sótanos, de forma exitosa, sin afectaciones a inmuebles vecinos o vialidades, el suministro de materiales y la realización de actividades complicadas, en la medida de lo posible fueron realizadas en horario nocturno (de madrugada) para interferir lo menos posible con la actividad de la zona.

El proceso de excavación “top-down” permitió alcanzar la profundidad máxima de excavación de proyecto, desarrollando el 100% de los trabajos dentro del mismo predio, sin afectaciones importantes en el tránsito sobre las vialidades aledañas.

La estructura en general tuvo un comportamiento adecuado durante todo el proceso constructivo, específicamente el muro Milán no presentó grietas o problemas de filtraciones o deformaciones significativos que pusieran en riesgo la estabilidad o estanqueidad del proyecto.

Referencias

- [1] CIMANC, “Estudio geotécnico para el diseño de la cimentación de un edificio de 15 niveles, azotea y 16 sótanos desplantado a 49.00m de profundidad”, 2015.
- [2] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, “Manual of steel construction - Allowable Stress Design”, Ninth edition, 1991.
- [3] GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones”, 2004.
- [4] GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, 2004.
- [5] GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, 2004.