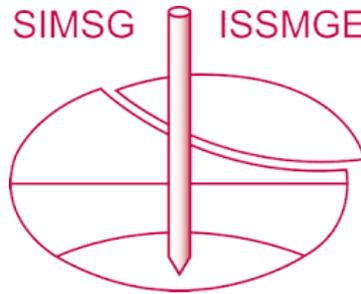


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Diseño y construcción de una losa de cimentación de 57,000m² en dos niveles para albergar un centro comercial, desplantado en estratos arcillosos deformables de la zona sur de la Ciudad de México

Gabriel LIRA ALVAREZ^{a,1}, Guillermo CLAVELLINA^a y German ESTEVEZ^a

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

Resumen. El proyecto descrito en este documento se localiza al sur de la Ciudad de México y se asienta dentro de un gran predio comercial de 57,000 m². El Proyecto consiste en la construcción de un centro comercial cuyo concepto arquitectónico dará un cambio importante al entorno urbano. Debido a las dimensiones del proyecto, solo se requiere la realización de un sótano de estacionamiento en la totalidad de la huella del predio y un segundo sótano parcial en la zona central del predio. Dada la geometría del predio y su muy importante superficie, se requirió de un estudio detallado del comportamiento de la cimentación, considerando la interacción suelo-estructura, haciendo hincapié en las deformaciones de la propia estructura y de sus colindancias. El trabajo puntualiza sobre el diseño de la losa de cimentación, así como en el proceso de estabilización y excavación de los sótanos.

Palabras Clave. Losa de cimentación, cimentación compensada, suelos blandos, suelos deformables, diseño de losa, pilas CFA, auger.

1. Introducción

El desarrollo de centros comerciales en la Ciudad de México ha manifestado una intensa actividad, por un lado, aprovechando espacios antes empleados para usos industriales, así como el reaprovechamiento y mejoramiento de los espacios ya destinados a un uso comercial. Una constante en ambos casos es la intervención que tienen los proyectos en el entorno urbano ya que en la mayoría de éstos se privilegia el desarrollo de espacios para la actividad económica, espacios de convivencia, mejoramiento urbano, además de incrementar la plusvalía de la zona. El proyecto abordado en este documento se asienta en un predio de aproximadamente 57,000 m², ubicado al sur de la Ciudad de México, específicamente en la zona de Coapa -ver Figura 1- y para el cual se desarrolló una

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.

propuesta de solución de la cimentación basada en una losa en dos niveles, complementada por pilas tipo CFA (continuous fly auger).

La particularidad del proyecto radica en el diseño de la losa de cimentación, debido a varios factores: la estructura está sobre-compensada y el efecto de la subpresión a largo plazo impondrán al inmueble una tendencia a emerger, sobre todo sabiendo que, por la propia arquitectura del proyecto, es decir, un sótano en la totalidad del predio y un segundo sótano parcial sensiblemente al centro del predio, imponen condiciones de alivio de esfuerzos y subpresión con diferencias importantes. Adicionalmente, la losa deberá ser capaz de recibir y distribuir lo mejor posible las cargas puntuales debido a la superestructura (marcos de concreto en retícula de 16x8m), sin sufrir deformaciones diferenciales que pongan en riesgo la estanqueidad de los sótanos ni el buen funcionamiento de los mismos.



Figura 1. Ubicación del proyecto.

1.1. Descripción del proyecto

El proyecto contempla la construcción de un centro comercial dentro de un predio de aproximadamente 57,000m². El proyecto arquitectónico, considera planta baja más dos niveles, así como un sótano en la totalidad de la huella de la edificación más un segundo sótano parcial sensiblemente al centro de dicha huella –ver Figura 2-. El nivel del sótano 1 se ubica 4.05m por debajo del nivel de planta baja y el sótano 2 a 7.65m por debajo del nivel de planta baja (todos medidos a nivel de piso terminado de las losas); de lo anterior se estimó que para la construcción del sótano 1 se excavará en promedio 4.50m por debajo del nivel de PB. Asimismo, para la construcción del sótano 2, la excavación se realizará en promedio 8.20m por debajo del nivel de PB. -ver figura 2.

La cimentación de la edificación es mediante un cajón de cimentación parcialmente compensado, adicionando pilas de fricción con la intención de tomar la diferencia de presiones en la masa de suelo (carga neta) ocasionado por el retiro de suelo (presión de compensación) y la presión debida a la estructura.

El sistema de estabilización de la excavación y el cual forma parte del cajón de cimentación, es mediante un muro diafragma estructural definitivo trabajando en voladizo, es decir, estable sólo por su condición de empotramiento en el suelo.

Referente a las pilas de fricción para completar el sistema de cimentación, se propuso la construcción de pilas tipo CFA de 62 y 82cm de diámetro nominal, en una

retícula homogénea (8x8m), construidas desde el nivel de excavación de sótano 1 y con una profundidad de desplante a 14.0m.

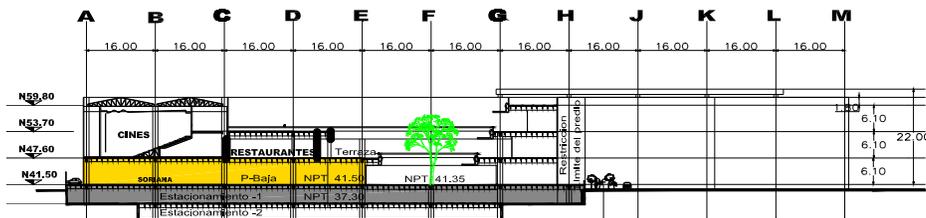


Figura 2. Corte trasversal del proyecto.

2. Condiciones geotécnicas

De acuerdo a las referencias [1,2,3], información geotécnica desarrollada para el proyecto, de su revisión y análisis se define el modelo geotécnico de la tabla 1, el cual se empleó para el diseño del sistema de estabilización de la excavación y para las revisiones realizadas en el presente documento:

Tabla 1. Modelo geotécnico

Soil layer	Initial depth (m)	Final depth (m)	γ (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)	E ₅₀ (t/m ²)
U1	0.0	3.0	1.75	5.0	5	1200
U2	3.0	10.5	1.20	4.0	0	600
U3	10.5	12.8	1.60	2.5	28	1100
U4	12.8	17.0	1.20	3.0	0	500
U5	17.0	26.2	1.75	5.0	32	1500
U6	26.2	28.7	1.30	2.0	5	550
U7	28.7	¿?	1.85	4.0	34	10000

donde γ . – Peso volumétrico del suelo; c.- Cohesión; ϕ . – Ángulo de fricción; E₅₀.- Módulo de elasticidad; U1.- Costra superficial; U2. - Arcilla blanda; U3.- Arena arcillosa compacta; U4.- Arcilla blanda con lentes de arena; U5.- Arena arcillosa compacta; U6.- Arcilla de consistencia blanda; U7.- Arena poco limosa muy compacta.

Referente al nivel freático, éste se definió entre 2.6 y 3.0m de profundidad, sin embargo, para efectos de cálculo se determinó su ubicación a 2.5m de profundidad con una distribución hidrostática.

3. Propuesta de estabilización y sistema constructivo de la cimentación

Se construyó un muro diafragma estructural definitivo de 50 cm de espesor en todo el perímetro del sótano 1, el cual se desplantó a 14.0m de profundidad, referencias [4,5]. Concluido el muro perimetral se comenzó la extracción del agua freática atrapada en el recinto mediante pozos de abatimiento previamente perforados y equipados.

Abatido el nivel freático se inició con la excavación hasta el nivel inferior de losa de sótano 1 (4.45m de profundidad) más 40cm para generar una plataforma de trabajo con la capacidad suficiente para rodar equipo pesado, esto es 4.85m de profundidad

promedio; una vez alcanzado dicho nivel se inició con la construcción de las pilas CFA en toda la huella del sótano 1 y en una retícula de 8x8m; el nivel de desplante de dichas pilas fue a 14.0m de profundidad. La construcción de pilas CFA permitió la eliminación del manejo de lodos de perforación en obra (el cual hubiera sido necesario en caso de optar por pilas tradicionales), situación que fue trascendental para la logística de construcción, dado el número de elementos construidos cercanos a mil.

Posteriormente se excavó al interior del predio la zona del sótano 2 (9.45m de profundidad), dejando taludes perimetrales para estabilizar los cortes (cercaos a 70°) y con ello dar paso a la construcción de las pilas CFA restantes en la huella del sótano 2, la losa de sótano, así como el muro perimetral de dicho sótano, esto como obra civil convencional.

4. Revisión geotécnica y definición de módulos de rigidez de las pilas

4.1. Revisión de la capacidad a tensión de las pilas CFA

Las pilas de fricción dispuestas para la losa del sótano 1, son de 62cm de diámetro nominal, con un nivel de concreto sano a 6.25m de profundidad y un nivel de desplante a 14.0m de profundidad lo que incide en una longitud efectiva de estos elementos de 7.75m. Para el caso de las pilas del sótano 2 se propuso un diámetro teórico de elementos de 82cm, con nivel de concreto sano y nivel de desplante a 9.85 y 14.0m de profundidad, respectivamente. La capacidad de carga admisible a tensión definida para estos elementos, referencia [6], se estima en 86 y 64t, respectivamente.

4.2. Definición del módulo de rigidez de las pilas CFA

Para la representación de las pilas CFA dentro del modelo numérico de la revisión estructural de las losas de cimentación, se realizaron análisis de interacción suelo-estructura para obtener módulos de reacción asociados a las pilas; lo anterior con el objetivo de dotar a los modelos numéricos para el cálculo de la subestructura de una condición de apoyo más realista (mediante resortes), ya que el suelo debajo de las losas se deformará elásticamente a corto plazo permitiendo una generación de elementos mecánicos más aproximada y favorable, en comparación con una condición de apoyos rígidos.

Para la estimación de los módulos de rigidez que representaran a las pilas CFA se realizaron modelos axi-simétricos de elementos finitos mediante el programa comercial Plaxis 2D, empleando el modelo geotécnico de la tabla 1.

Los suelos fueron modelados como materiales con comportamiento elasto-plástico, definiendo la fase plástica con una ley de resistencia Mohr-Coulomb, con parámetros de cohesión, c y ángulo de fricción, ϕ . Referente a la fase elástica se asignaron parámetros de módulo de elasticidad, E , y una relación de Poisson, ν ; los materiales fueron modelados con un modelo constitutivo Hardening-Soil, el cual permite obtener desplazamientos más realistas en problemas de excavación, debido a que este modelo constitutivo considera los módulos de elasticidad en compresión y descarga, E_{50} y E_{ur} , respectivamente. De acuerdo a datos prácticos el módulo en fase de descarga es al menos 3 veces el módulo en compresión $E_{ur}=3E_{50}$. Para los análisis se emplearon las

propiedades mostradas en la tabla 1 y el módulo de descarga se definió mediante la siguiente expresión $E_{ur}=3E_{50}$.

El cuerpo de la pila (concreto) en los modelos se consideró como volumen y para ello se definió un modelo constitutivo elástico lineal cuyos datos de entrada son el módulo de elasticidad del concreto E_{con} , y la relación de Poisson, ν ; que para este caso el E_{con} se determina mediante $14000(f'c)^{0.5}$ siendo $f'c=300\text{kg/cm}^2$, y un $\nu=0.2$. Las dimensiones del modelo se definieron considerando la mitad de la separación entre pilas, esto es 4.0m.

El nivel freático se definió a 2.5m de profundidad, con respecto al nivel de terreno natural. Los análisis fueron realizados en condiciones estáticas.

La secuencia analizada en los modelos es la siguiente:

- Condiciones iniciales
- Construcción de pila
- Abatimiento del nivel freático (NAF)
- Excavación
- Aplicación de cargas

Para el modelo axi-simétrico de las pilas CFA de 62cm de diámetro, sótano 1 - se consideró una excavación a 6.0m de profundidad, un abatimiento efectivo a 7.5m de profundidad y se realizaron incrementos de carga de 10t hasta alcanzar 80t (presión de 35 a 280t/m^2), con lo cual se pudo obtener la gráfica de comportamiento mostrada en la Figura 3, y con ella definir un módulo de reacción promedio igual a 16000t/m^3 .

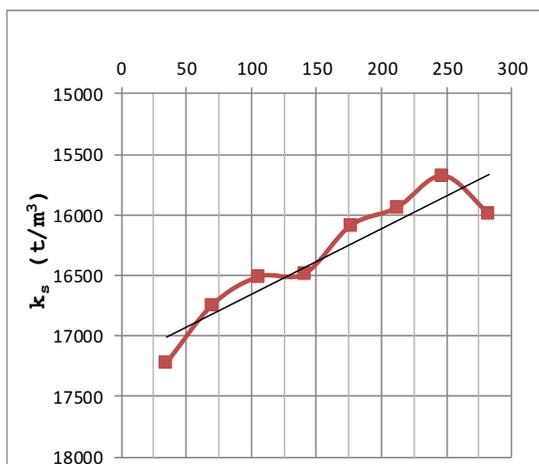


Figura 3. Módulo de rigidez de pila CFA 62cm, sótano 1.

Para el modelo axi-simétrico de las pilas CFA de 82cm de diámetro, sótano 2, se consideró una excavación y abatimiento efectivo a 9.65 y 12.0m de profundidad, respectivamente, y se realizaron incrementos de carga de 5.0t hasta alcanzar 60t (presión de 10 a 115t/m^2), con lo cual se pudo obtener la gráfica con un comportamiento lineal mostrada en la Figura 4, y con ella se define un módulo de reacción promedio igual a 4500t/m^3 .

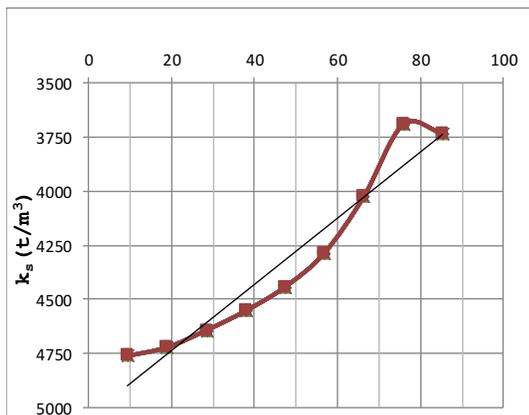


Figure 4. Módulo de rigidez de pila CFA 82cm, sótano 2

5. Propuestas de abatimiento del nivel freático y estimación de módulos de rigidez, losas y muro diafragma

5.1. Estimación de desplazamientos producto del abatimiento. Análisis en 3D con programa SEETLE

Para la revisión se planteó como hipótesis primordial el realizar un abatimiento intensivo especialmente al centro del predio, sabiendo que las expansiones mayores se tendrían en esta zona del predio y con la intención de provocar un asentamiento inicial en la zona susceptible a las mayores expansiones previo a la construcción del inmueble. El objetivo fue que las expansiones acumuladas sean menores o muy similares al asentamiento total inducido por el abatimiento.

Para lograr lo anterior se perforaron pozos al centro del predio hasta una profundidad de entre 20-25m. Para las zonas perimetrales del predio se perforaron pozos de menor longitud, aproximadamente a 12m de profundidad, lo anterior para mitigar el riesgo de afectación a los predios vecinos además de saber que la magnitud de asentamientos es menor hacia la periferia del proyecto.

Para la estimación de los desplazamientos se realizó un análisis con el programa comercial SETTLE3D V3.0. La estimación de asentamientos se realizó mediante el cálculo de la distribución de esfuerzos por el método de Boussinesq y para esta fase se emplearon únicamente parámetros de deformación elásticos del suelo, con lo cual se obtienen deformaciones igualmente elásticas.

Las condiciones de frontera definidas en el modelo fueron al menos una vez el ancho mayor del proyecto y se estableció una profundidad de análisis hasta 80m. Para el análisis se definió una secuencia constructiva de cinco etapas principales, sin contar las condiciones iniciales, estas son:

- Abatimiento a 20m de profundidad
- Excavación al nivel -5.0m
- Construcción de pilas de sótano 1 (sobrecarga 1.4t/m²)
- Excavación al nivel -9.0m
- Construcción de pilas de sótano 2 (sobrecarga 1.0t/m²)

Para la primera etapa de análisis, abatimiento del NAF -14.0m, se estimó un asentamiento teórico de 11.6cm en superficie y este abatimiento produce un asentamiento al nivel de fondo de la excavación del orden de 10.5cm.

La excavación a -5m, para la construcción del sótano 1, incide en tener un desplazamiento acumulado de 4.0cm al centro del predio y entre 4 y 10cm en las colindancias, esto es, las expansiones al centro del predio se estiman cercanas a 8cm y en el perímetro de 6 a 1cm -ver Figura 5-.

Construidas las pilas del sótano 1 y realizada la excavación del sótano 2, a -9m, se obtienen asentamientos totales entre 2.5 y 11cm al centro y perímetro del sótano 2, respectivamente; esto es, se recupera el suelo entre 12.5 y 4cm con respecto al asentamiento inicial -ver Figura 6-. Es importante señalar que debido a las características del programa SETTLE3D, el abatimiento del nivel freático sólo puede modelarse desplazando el nivel uniformemente en el modelo, cuando en la realidad sólo se pretende llevar este abatimiento más profundo al centro del predio; por lo anterior se interpretó que los asentamientos totales reales en el perímetro de cada sótano tenderían a ser similares a los valores de asentamiento de la zona central.

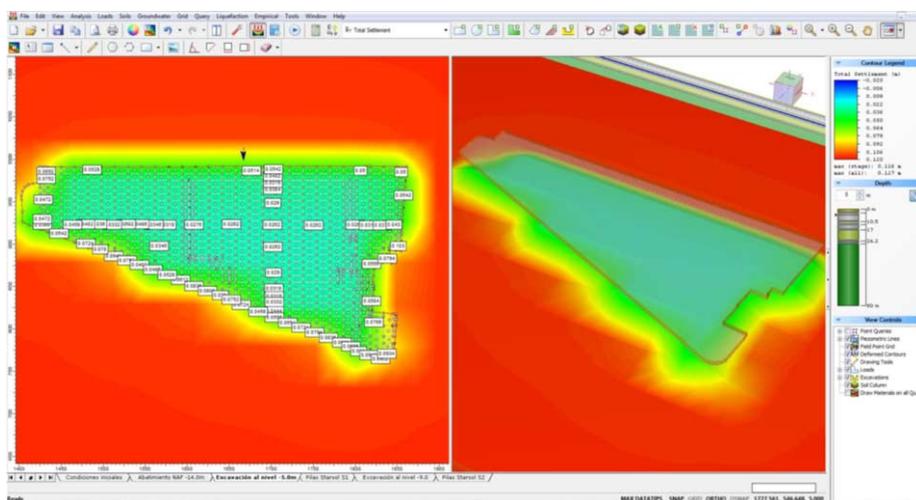


Figura 5. Asentamientos totales a -5m debido a la excavación del sótano 1.

De lo anterior, se determina que el abatimiento del nivel freático permitirá contrarrestar las expansiones del terreno debidas a la excavación.

5.2. Estimación de desplazamientos producto del abatimiento, Análisis en 2D con programa PLAXIS

Como validación de la estimación teórica de los desplazamientos, se realizó un modelo de elemento finito empleando el programa comercial PLAXIS 2D V2016 para analizar un corte transversal del Proyecto. En el modelo se realizó el cálculo de abatimiento empleando elementos “well” para representar la presencia de los pozos de abatimiento además de realizar un análisis acoplado de flujo-deformación (fully coupled flow-deformation, FCFD).

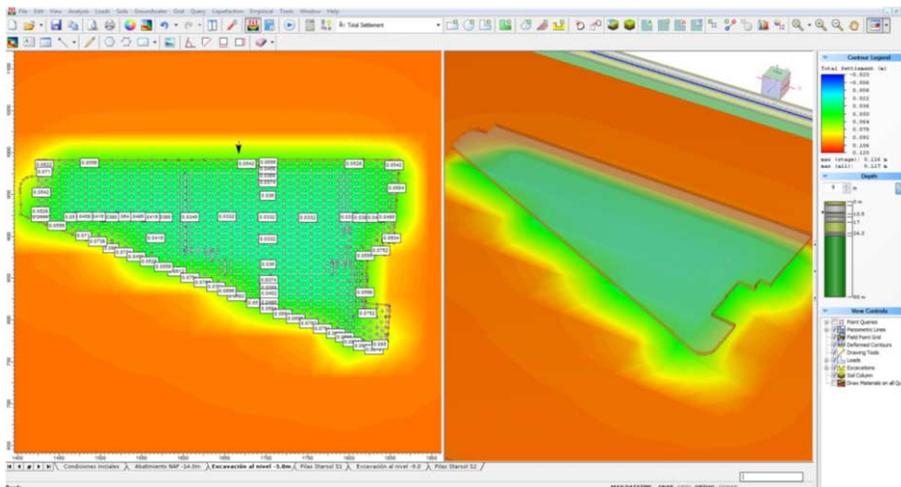


Figura 6. Asentamientos totales a -9m debido a la excavación del sótano 2

Para el modelo de análisis se emplearon las propiedades geomecánicas de la tabla 1, y como información adicional para los cálculos acoplados, FCFD, se asignaron los valores de permeabilidad siguientes: estratos arcillosos $k=1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ y para los estratos arenosos una permeabilidad de $k=1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

Adicional a las hipótesis del numeral 4.2 respecto a las consideraciones para la elaboración del modelo numérico de análisis; para la representación de los elementos estructurales se emplearon elementos “plate” o placa para modelar a los muros y losas, asimismo para las pilas tipo CFA con la consideración de la separación entre elementos ponderando sus propiedades. Las propiedades asignadas a los elementos placa son EA, rigidez axial y EI, rigidez a flexión, esto es, el módulo de elasticidad del concreto multiplicado por la sección transversal del elemento y la inercia de la sección, respectivamente. La secuencia de análisis fue la siguiente:

- Condiciones iniciales.
- Construcción del muro Milán.
- Abatimiento a 14m de profundidad.
- Excavación al nivel -5.0m.
- Construcción de pilas de sótano 1.
- Construcción de losa de sótano 1.
- Excavación al nivel -9.0m.
- Construcción de muros y pilas del sótano 2.
- Construcción de losa de sótano 2.
- Construcción de estructuras
- Condición a largo plazo con recuperación del NAF

En la Figura 7, se presenta la configuración deformada y presiones de poro producto del abatimiento y en la Figura 8 se presentan los desplazamientos teóricos producto del abatimiento, en donde se puede observar un asentamiento máximo al centro del predio del orden de 17cm, parámetro que presenta muy buena correspondencia con los resultados obtenidos con SETTLE.



Figura 7. Malla deformada, etapa de abatimiento

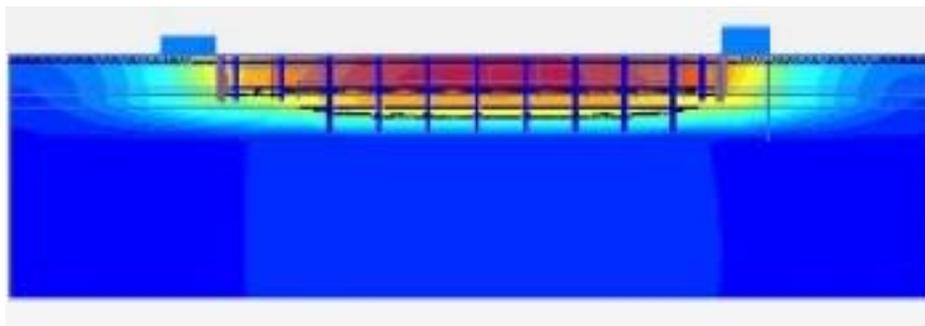


Figura 8.- Desplazamientos verticales debidas al abatimiento, $U_{y,max}=17.5\text{cm}$.

5.3. Definición del módulo de rigidez para apoyo de las losas y muro diafragma

La estimación de los módulos de rigidez de las losas y muro diafragma se obtuvo del análisis 2D de elemento finito, para su cálculo se relacionó el valor del esfuerzo total vertical debajo de una sección representativa de cada elemento y el desplazamiento vertical debajo del mismo, desde la etapa de construcción de cada elemento y hasta la etapa final de construcción.

De lo anterior se pudo determinar para la losa de sótano 1 un módulo de rigidez vertical $k_s=100\text{t/m}^3$, para la losa de sótano 2 un $k_s=60\text{t/m}^3$ y para el muro diafragma $k_s=2200\text{t/m}^3$. En efecto se tomaron en cuenta los valores promedio tanto de los esfuerzos como de los desplazamientos, ambos verticales, obtenidos de las diferentes etapas del análisis.

6. Modelo de análisis estructural de la losa de cimentación

Considerando las rigideces del suelo debajo del desplante de la losa, del muro diafragma y de las pilas de cimentación, así como las descargas debidas a la estructura, se realizó un modelo estructural 3D mediante el programa SAP2000 v.18 - ver Figura 9-. Con base en dicho modelo y tomando en consideración las recomendaciones del RCDF, referencia [7], se propusieron las secciones finales de los elementos de la cimentación (losa y contratrabes) y se estimaron los elementos mecánicos para diseño estructural. De esta forma fue posible proponer secciones para la losa de cimentación y contratrabes que permitan controlar los movimientos diferenciales en la losa, así como reforzarla para tener un adecuado comportamiento, referencia [8].

Las secciones propuestas para las losas fueron las siguientes: losa de sótano 1, contratrabes de 140cm de peralte y 60cm de ancho junto con una losa maciza de 40cm; sótano 2, contratrabes de 200cm de peralte y 60cm de ancho junto con una losa maciza de 50cm de espesor.

En las Figuras 10 y 11 se puede apreciar algunos aspectos durante el proceso constructivo de la losa de cimentación.

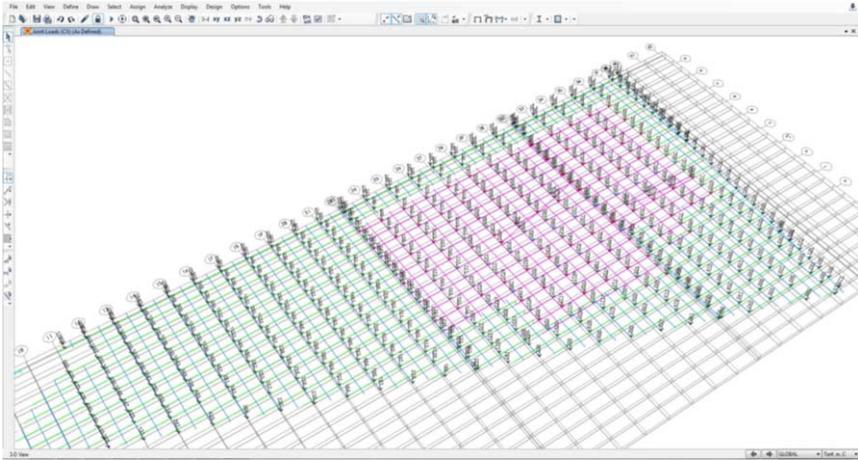


Figura 9. Modelo numérico estructural en programa SAP2000.



Figura 10. Imágenes del proceso constructivo de la losa.



Figura 11. Imágenes del proceso constructivo de la losa.

7. Conclusiones

Para garantizar el adecuado comportamiento y funcionamiento de una losa de cimentación que forma parte de un cajón localizado debajo del nivel freático, es necesario realizar un diseño estructural que tenga en consideración su interacción con el suelo, por lo que es esencial la estimación de los módulos de rigidez de cada uno de los elementos que intervienen, por ejemplo, suelo en el desplante de la losa, pilas de cimentación, muros diafragma, etc. Mientras mayor sea la superficie de la losa de cimentación, el riesgo de presentarse movimientos diferenciales que comprometan el comportamiento y funcionamiento de la misma se incrementa.

El presente documento presenta un ejemplo de las hipótesis y análisis realizados para considerar los factores antes mencionados en el diseño de una losa de cimentación de 57,000 m².

Referencias

- [1] Fidel Nader Delgado, “ Estudio de Mecánica de suelos Informe preliminar primera etapa, Centro Comercial Villa Coapa”, 2010.
- [2] Fidel Nader Delgado, “ Estudio de Mecánica de suelos segunda etapa, Centro Comercial Villa Coapa”, 2012.
- [3] CIMANC, “Revisión geotécnica de la cimentación del centro comercial Villa Coapa, elaborado por Cimentaciones y Anclajes S.A. de C.V.”, 2015
- [4] CIMESA, “Propuesta de sistema de estabilización de la excavación y proceso constructivo de la cimentación “Centro comercial Gran terraza Coapa”, elaborado por Cimentaciones Mexicanas S.A. de C.V”, 2014
- [5] CIMESA, “Memoria de cálculo, Diseño Estructural del Sistema de estabilización de la excavación”, 2016
- [6] SOLETANCHE-BACHY, “STARSOL® Pieu fore injecte au tube plongeur”, Edition 3, 2005
- [7] GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, 2004.
- [8] GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, 2004.