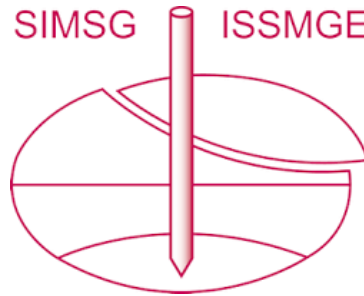


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Estudio de una Cimentación semi-profunda de grandes dimensiones alojada en las arcillas del Valle de México

Diego PÉREZ^{a,1}, Roberto AYALA^a, Miguel RAMÍREZ^b y Anastacio PÉREZ^c

^aIngenieros Civiles Asociados (ICA), Ingeniería (Geotecnia), México, CDMX

^bIngenieros Civiles Asociados (ICA), División de Ingeniería, México, CDMX

^cIngenieros Civiles Asociados (ICA), Ingeniería (Instrumentación), México, CDMX

Resumen. En este artículo se presenta la comparativa del comportamiento deformacional y piezometría entre el modelado numérico de elemento finito y las mediciones reportadas con la instrumentación, para la estructura denominada APM, que forma parte de la losa de cimentación del edificio terminal para el NAICM. La interpretación de esta información resultó un valor agregado dentro del proyecto, para identificar las soluciones constructivas que permitieron mitigar la ocurrencia de grandes desplazamientos durante la construcción.

Palabras Clave. Cimentación, suelos blandos, modelado numérico, instrumentación.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

En 1980, un proyecto aeroportuario muy ambicioso fue planeado al sur del antiguo lago de Texcoco. Este proyecto incluía la construcción de una terminal y cuatro aeropistas en una superficie de $3.0 \times 10^7 \text{ m}^2$. Sin embargo, el proyecto resultó incosteable por el importe y las obras inducidas [1].

En 2001, otro proyecto aeroportuario fue mencionado para construcción. Este aeropuerto también incluía la construcción de cuatro aeropistas, pero este fue cancelado por problemas sociales [1].

En 2014, un nuevo proyecto aeroportuario fue planeado, también en el antiguo lago de Texcoco. Este proyecto incluye la construcción de una terminal y seis aeropistas en una superficie de $5.1 \times 10^7 \text{ m}^2$; la superficie está catalogada como zona federal, para mitigar los problemas sociales. La magna obra fue denominada el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM).

El proyecto del NAICM fue dividido en dos áreas de trabajo: Lado Tierra (edificio terminal y torre de control) y Lado Aire (aeropistas, plataformas y calles de rodaje). El Arquitecto Maestro (consorcio integrado por la compañía ARUP y Norman Foster) fue el diseñador del proyecto Lado Tierra. El Ingeniero Civil Maestro (consorcio integrado

¹ Autor de correspondencia, Diego Pérez, Departamento de Ingeniería, Av. Patriotismo 201, Benito Juárez, Ciudad de México, México; E-mail: diego.perez@ica.mx.

por las compañías Netherlands Airport Consultants, Grupo SACMAG y TADCO Constructora) fue el diseñador del proyecto Lado Aire [2].

El NAICM se realizará con la presencia de un suelo arcilloso de origen lacustre de un alto contenido de agua, y caracterizándose por su alta compresibilidad y baja resistencia al esfuerzo cortante.

La construcción de la losa de cimentación, para el edificio terminal del NAICM, fue asignada, a través de una licitación internacional, al consorcio integrado por las compañías ICA Construcción e Infraestructura, S.A. (ICACISA) e Impulsora de Desarrollo Integral, S.A. (IDINSA).

El concepto de la cimentación para el edificio terminal consistió en una compensación. Este concepto consiste en igualar los pesos del volumen excavado con la suma de los pesos de las estructuras de cimentación y edificio terminal. A esta similitud de pesos se le conoce como una cimentación compensada.

Al norte de la losa de cimentación, se presentó uno de los mayores retos técnicos y constructivos, porque fue una zona semi-profunda con geometrías irregulares, y de grandes dimensiones. Esta zona es conocida como *Automatic People Mover* (APM).

1.2. Objetivo

Estudiar el comportamiento deformacional y piezométrico del suelo arcilloso, con base en un modelado numérico e instrumentación, durante el proceso constructivo de la cimentación semi-profunda de grandes dimensiones, APM, perteneciente a la losa de cimentación del edificio terminal para el NAICM, alojada al nororiente de la zona metropolitana del valle de México.

2. Descripción del proyecto

2.1. Ubicación y zonificación geométrica

En la Figura 1, se observa la ubicación de la losa de cimentación y su zonificación geométrica, cuyo criterio fue el nivel máximo de excavación.

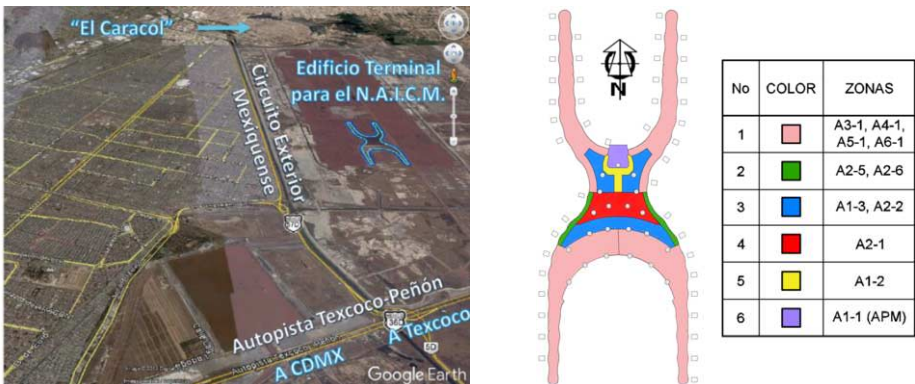


Figura 1. Ubicación (editada de Google Earth) y zonificación geométrica de la losa de cimentación.

Véase que el proyecto se encuentra al nororiente de la zona metropolitana del valle de México (antiguo lago de Texcoco) y sus colindancias son: autopista Peñón-Texcoco, Circuito Exterior Mexiquense y el “Caracol”; al sur, poniente y norte, respectivamente. Además, la zona A1-1 (APM) fue la más profunda del proyecto, 9.1 m.

2.2. Modelo geotécnico y piezometría

En la Tabla 1, se presenta de forma parcial las propiedades geotécnicas del modelo geotécnico, cuya información fue proporcionada por ARUP en 2017.

En general, hay nueve estratos: Costra Superficial (CS), Formación Arcillosa Superior (FAS), Capa Dura (CD), Formación Arcillosa Inferior (FAI), Serie Estratigráfica Superior (SES), Formación Arcillosa Profunda (FAP), Serie Estratigráfica Inferior (SEI), Formación Arcillosa Profunda 2 (FAP 2) y Serie Estratigráfica Inferior 2 (SEI 2).

Las propiedades indicadas en la tabla son: espesor (H), peso volumétrico (γ), relación de sobre consolidación (OCR), cohesión (c^{ref}), ángulo de fricción (ϕ), módulo de deformación (E_{50}^{ref}) y modelo reológico (MR). Los MR fueron Mohr-Coulomb (M-C) y Hardening Soil-Small (HS-S).

Tabla 1. Modelo geotécnico y distribución de la presión de agua.

No (-)	Estrato (-)	H (m)	γ (kN/m ³)	OCR (-)	c^{ref} (kPa)	ϕ (°)	E_{50}^{ref} (kPa)	MR (-)
1	CS	1.0	14.0	-	1.0	35	20,000	M-C
2	FAS	29.0	12.0	1.8	0.1	41	300	HS-C
3	CD	1.5	16.0	1.0	0.1	38	1,250	HS-S
4	FAI	11.5	13.1	1.0	0.1	36	375	HS-S
5	SES	11.0	14.0	1.0	0.1	35	1,000	HS-S
6	FAP	13.0	13.5	1.0	0.1	35	800	HS-S
7	SEI	23.0	16.0	1.0	0.1	35	1,850	HS-S
8	FAP 2	15.0	13.5	1.0	0.1	35	900	HS-S
9	SEI 2	45.0	16.0	1.0	0.1	35	2,000	HS-S

El Nivel de Agua Freática (NAF) se ubicó a 1.0 m de profundidad. De forma general, la distribución de la presión del agua tuvo un incremento lineal (10.0 kPa/m) hasta los 22.0 m, condición hidrostática. Posteriormente, la presión fue constante hasta los 60.0 m de profundidad. Finalmente, esta tuvo nuevamente un incremento lineal (10.0 kPa/m) hasta los 150.0 m de profundidad.

2.3. Instrumentación

La instrumentación contribuyó significativamente en el desarrollo del proyecto, porque se pudo corroborar que los resultados del modelado numérico fueron consistentes con estas mediciones.

Las lecturas de estos instrumentos se fueron registrando en tiempo real en una plataforma denominada Geoviewer, configurada por el área de instrumentación del consorcio constructor [3].

En la Figura 2, se presenta la ubicación de la instrumentación para el APM, la cual estuvo compuesta con cinco inclinómetros automatizados: dos al oriente, INI-APM 2 e INI-APM 4, dos al poniente, INI-APM 1 e INI-APM 3, y uno al sur, INI-APM 5. Además, se instalaron tres piezómetros de cuerda vibrante, de norte a sur son: PZCV APM 2, PZCV APM 5 y PZCV APM 3.

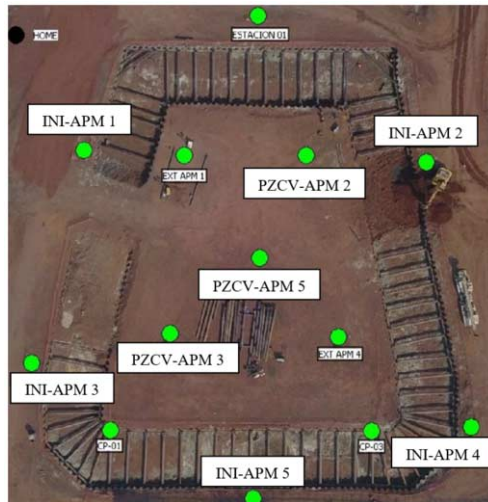


Figura 2. Ubicación de los inclinómetros automatizados y piezómetros de curva vibrante.

3. Modelado numérico

El modelado numérico se desarrolló con el método del elemento finito (MEF) en tres dimensiones, utilizando una herramienta comercial, PLAXIS 3D, además, una herramienta de dibujo, AutoCAD 3D, de la compañía Autodesk.

En la Figura 3, se observa una imagen del modelo de cálculo mostrando la malla de elementos finitos, lado izquierdo, y el grado de detalle que se elaboró en el mismo. Nótese la tablestaca metálica, los dos niveles de troqueles, la viga madrina y la sobrecarga, y la secuencia de excavación perimetral del APM.

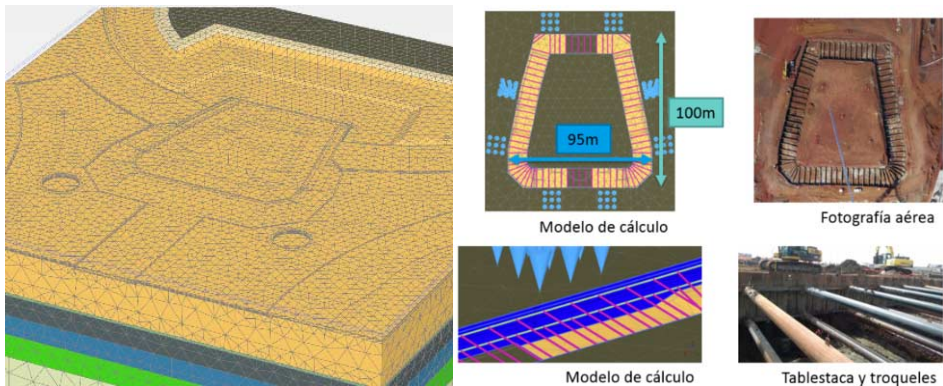


Figura 3. Malla de elementos finitos y detalles geométricos del modelado.

Este modelado consideró las premisas del procedimiento constructivo, el cual se puede simplificar en dos grupos de actividades: el primer grupo fue una excavación de alivio, excavación a 3.5 m de profundidad con un talud de relación 3.0:1.0 (H:V), continuación de la excavación hasta 5.0 m, una berma intermedia de al menos 20.0 m, y la misma relación de talud; el segundo grupo fue continuar la excavación con un

soporte temporal hasta 9.1 m, compuesto por tablestaca metálica (AZ-19-700) y troqueles (secciones OC de 3/8" y 1/2", precarga de 50 kN y 100 kN, para el primer y segundo nivel, respectivamente) [4].

A partir del nivel máximo de excavación, se instaló una geomalla triaxial, colocación de una capa de tezontle, 0.50 m de espesor, construcción de una plantilla de concreto reforzado, 0.15 m de espesor, resistencia a la compresión de 30 MPa (300 kg/cm²), instalación de una geomembrana impermeable, y la construcción de la losa de cimentación de espesor variable, y resistencia a la compresión de 45 MPa (450 kg/cm²). La geomalla triaxial tuvo la finalidad para que las partículas del tezontle no se incrustaran en la arcilla.

4. Comportamiento deformacional y piezométrico

4.1. Inclínómetros

En la Figura 4, se observa los desplazamientos horizontales estimados en el INI-APM 5, cuya identificación son: P3D E 1NT (excavación hasta el primer nivel de troqueles), P3D E 2NT (excavación hasta el segundo nivel de troqueles), P3D E NME (excavación hasta la profundidad máxima) y P3D R 2NT (retiro del segundo nivel de troqueles). Además, estos corresponden de noviembre del 2017 a febrero del 2018.

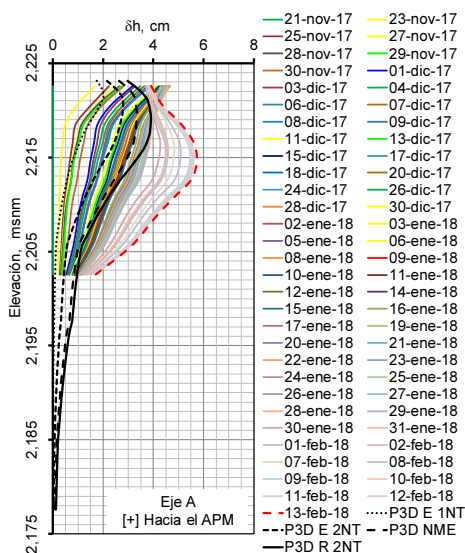


Figura 4. Desplazamiento horizontal (δh) de los inclinómetros.

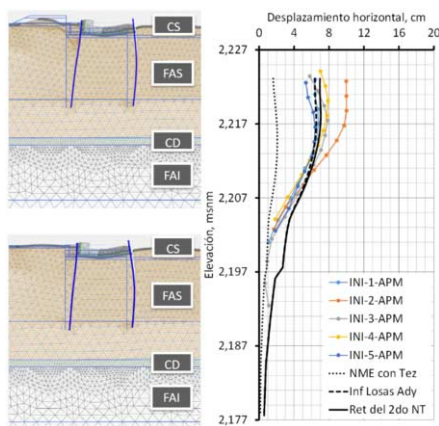


Figura 5. Comparativa entre los δh estimados versus medidos con los inclinómetros.

Véase que el desplazamiento horizontal máximo durante la excavación perimetral del APM alcanzó hasta 0.06 m (6 cm), y estos se disiparon a una profundidad mayor que 20.0 m. La elevación 2218.43 msnm corresponde a la profundidad máxima de excavación del APM.

Con base en el comportamiento observado, se realizaron mesas de trabajo, donde se debatieron hipótesis del comportamiento deformacional, procediendo a realizar un

modelo simplificado, bidimensional, hallando que la construcción de las losas adyacentes, a pesar de que estas se encontraban a una distancia significativamente retirada, generaba una especie de “oleaje”, Figura 5.

Este efecto no representó un riesgo para la construcción la losa de cimentación del APM, pero dejó en manifiesto que el modelo geotécnico adoptado corresponde excelentemente a lo observado in situ; en el modelado numérico tridimensional no se consideró la construcción de las losas adyacentes, porque estas se encontraban alejadas a la zona de interés.

A partir de esta experiencia y sumada al resto de la construcción de la losa de cimentación para el edificio terminal [5], se realizó una optimización de la secuencia de excavación del núcleo del APM.

4.2. Puntos de control topográficos

En la Figura 6, se presenta la evolución de los desplazamientos verticales estimados en el modelado numérico. Nótese que la secuencia consiste al procedimiento constructivo. La losa perimetral del APM fue construida en avances controlados, segmentos de 10x20 m, aproximadamente.

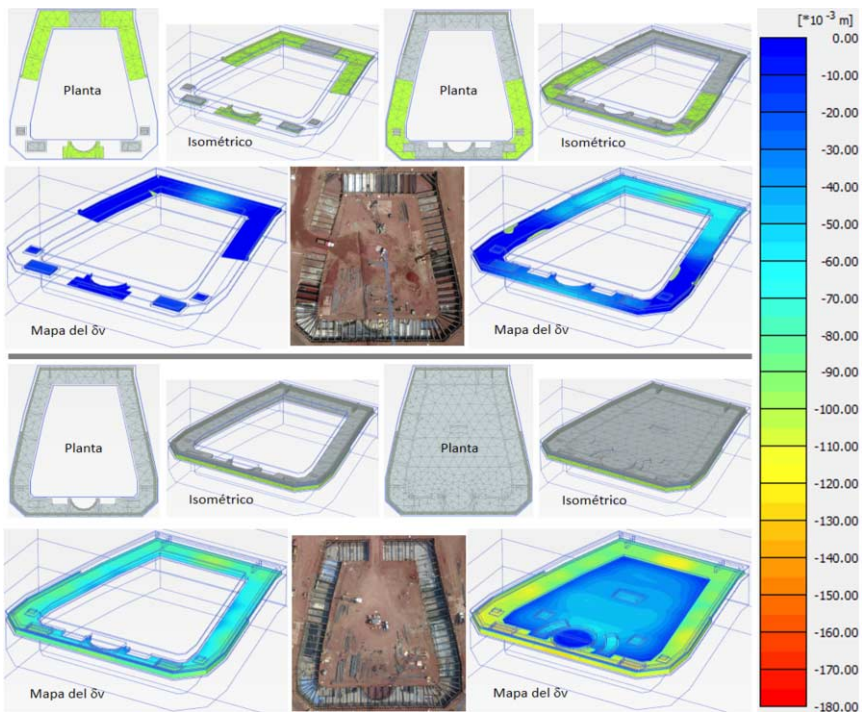


Figura 6. Desplazamientos verticales estimados en el modelado numérico, durante el proceso constructivo.

En la Figura 7, se observa los desplazamientos verticales (δv) asociado a las etapas constructivas, zona sur del APM. El nodo 82330 pertenece a la zona SW, y el nodo 56927 corresponde al centro, donde la losa perimetral tuvo un segmento menor que el promedio. Los nodos 597753 B y 485284 B fueron equivalentes a la posición de los nodos 82330 y 56927, respectivamente. Básicamente, fue una comparativa entre dos

tipos de malla, muy fina y mediana, para detectar alguna posible influencia por el mallado; el tiempo de cálculo llegó a alcanzar hasta dos días, entendiéndose que se definieron alrededor de 90 etapas de cálculo.

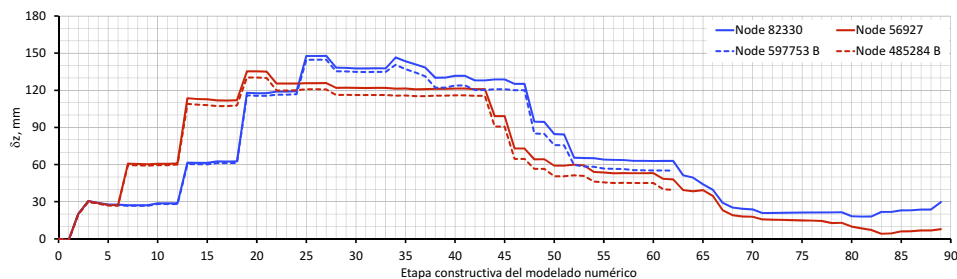


Figura 7. Desplazamientos verticales asociados a la secuencia constructiva, obtenido del modelado numérico.

En general, el desplazamiento vertical estimado fue de 0.12 m (12 cm) en la losa perimetral del APM, focalizado principalmente en la zona sur, y en el centro de la zona norte. Esta magnitud estuvo asociada a la influencia de la construcción de las losas contiguas, la excavación del núcleo y construcción del muro perimetral. Además, se pudo inferir una expansión al fondo de la excavación alrededor de 0.12 m (12 cm); los extensómetros registraron una magnitud consistente en la excavación de alivio.

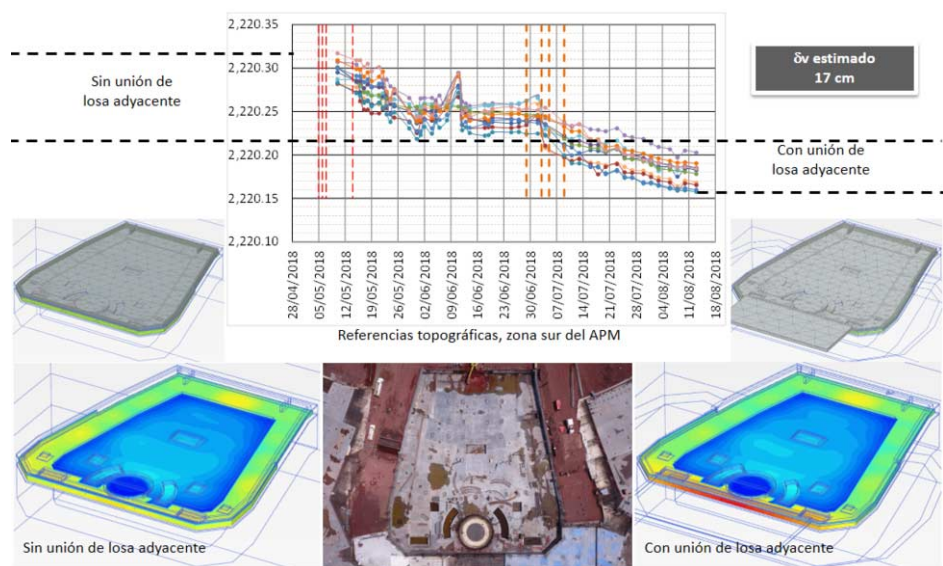


Figura 8. Desplazamientos verticales en el perímetro del APM.

En la Figura 8, se ilustra los desplazamientos verticales medidos en la zona sur del APM, hasta unir estructuralmente con la losa adyacente. Nótese que la unión estructural con la losa adyacente, incrementó ligeramente el desplazamiento vertical, hasta alcanzar 0.20 m (20 cm); el desplazamiento vertical estimado fue 0.17 m (17 cm), véase las zonas donde hay colores más cálidos.

En la Figura 9, se presenta una comparativa entre los desplazamientos verticales del modelado numérico versus el comportamiento *in situ*. Véase que el mapa de

elevación que elaboró la supervisión SIA, fue consiste con el comportamiento estimado. En la zona sur y norte, se presentaron superficies de menor elevación, en forma de “U” y al centro, respectivamente.

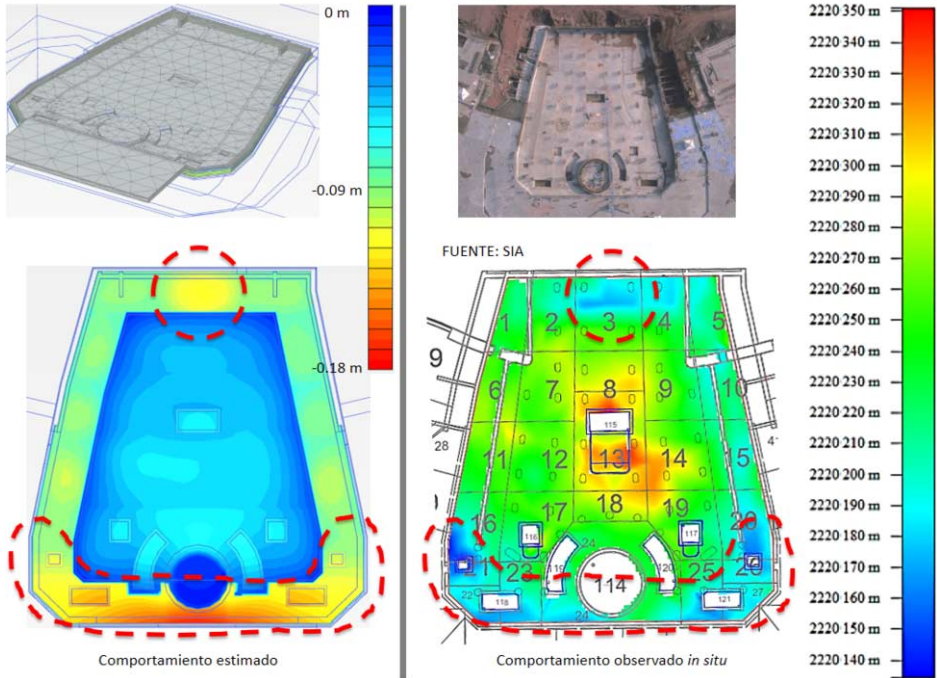


Figura 9. Comparativa entre los desplazamientos verticales estimados versus el comportamiento in situ.

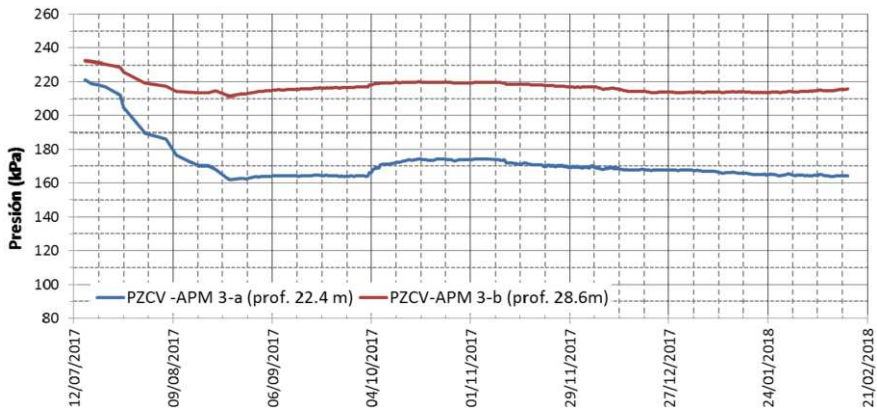


Figura 10. Evolución de la piezometría durante los trabajos constructivos, PZCV APM 3.

4.3. Piezometría

En la Figura 10, se presenta la evolución de las presiones de agua, obtenida con la estación piezométrica PZCV-APM 3.

Nótese que las presiones de agua tienen un decremento asociado a la excavación de alivio [3]; en la profundidad de 22.4 m se observa este decremento sustancial (comportamiento no drenado), sin embargo, a la profundidad de 28.6 m también se presenta este fenómeno, pero el decremento no es tan significativo, porque hay influencia de un estrato drenante, capa dura. Evidentemente, se puede interpretar que el comportamiento no drenado de la arcilla duró varios meses.

En general, el comportamiento estimado en el modelado numérico fue muy consistente con el comportamiento observado *in situ* durante el proceso constructivo.

5. Comentarios generales

Con base en lo descrito en este artículo, podemos interpretar lo siguiente:

- La cimentación semi-profunda de grandes dimensiones alojada en el valle de México, se ubica en una zona lacustre, compuesta por arcillas de alta compresibilidad y baja resistencia al esfuerzo cortante.
- En la zona norte del edificio terminal para el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, se ubica el APM, caracterizándose por ser una cimentación de grandes dimensiones y 9.1 m de profundidad.
- En comparativa entre los resultados del modelado numérico y las mediciones *in situ* de la instrumentación durante la construcción, se pudo interpretar un comportamiento consistente.
- El desarrollo ingenieril fue significativamente analizado y detallado, sumando los trabajos de construcción para obtener un excelente comportamiento, geotécnico y estructural, de la losa de cimentación del APM. Por tanto, la ligera desviación de centímetros que pudiera existir, entre lo estimado y reportado durante la construcción, básicamente fue el resultado de la variación espacial de los materiales altamente compresibles.

Referencias

- [1] Murillo R., Comportamiento del suelo y obras en el ex-lago de Texcoco, Publicación SMIG, *Revista Geotécnica* **238** (2016), 20–27.
- [2] Albarrán J. A., La ingeniería mexicana con la experiencia sustentada para enfrentar el proyecto NAICM, Publicación SMIG, *Revista Geotécnica* **238** (2016), 3–6.
- [3] Schmitter J. & Pérez A., Reflexiones sobre el comportamiento del subsuelo arcilloso del ex lago de Texcoco al ser excavado, XXIX RNIG (2018), Guanajuato, México.
- [4] Pérez-Centeno D., Ayala R., Nieto O. & Arvizu M., El comportamiento deformacional de una losa de cimentación de grandes dimensiones ubicada al nororiente del valle de México, XXIX RNIG (2018), Guanajuato, México.
- [5] Strassburger F., Barredes C. A. & Schmitter J., Aspectos geotécnicos de la cimentación para el Edificio Terminal del NAIM, Publicación SMIG, *Revista Geotécnica* **247** (2016), 17–23.