

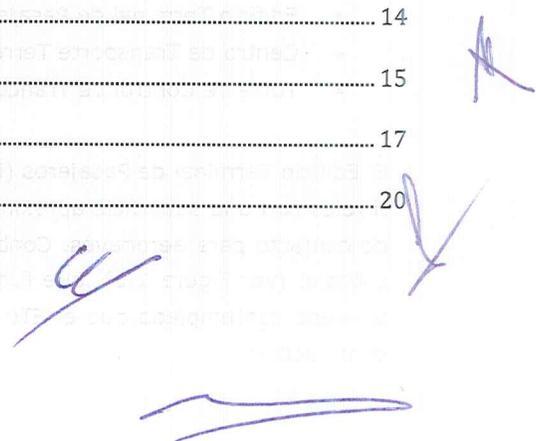
**DECLARACIÓN SOBRE LA CIMENTACIÓN
DE LOS EDIFICIOS
DEL NUEVO AEROPUERTO
INTERNACIONAL DE MÉXICO (NAIM)
CONSIDERADOS EN EL ALCANCE DEL
ARQUITECTO MAESTRO.**

| Elaboró: | Revisó: | Aprobó: |
|---|--|---|
|  Alan Tapia Camargo  Alberto Tenorio Jimenez |  José Vicente Vicent |  Ernesto Muñiz Martin |

| Revisión | Fecha | Modificaciones |
|----------|-------|----------------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

ÍNDICE

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO | 3 |
| 3. | CAMPAÑAS GEOTÉCNICAS | 6 |
| 3.1. | REALIZADAS PARA LA ETAPA DE DISEÑO..... | 6 |
| 3.1.1. | Sondeos geotécnicos con muestreo inalterado | 7 |
| 3.1.2. | Sondeos de penetración de cono eléctrico | 7 |
| 3.1.3. | Sondeo de sonda suspendida..... | 8 |
| 3.1.4. | Ensayes de laboratorio | 8 |
| 3.2. | Campañas complementarias..... | 9 |
| 4. | SOLUCIONES HABITUALES PARA CIMENTACIÓN DE EDIFICIOS EN EL SUELO DE LA CDMX..... | 9 |
| 4.1. | Cajones de cimentación..... | 9 |
| 4.2. | Pilotes | 10 |
| 4.2.1. | Pilotes de fricción..... | 11 |
| 4.2.2. | Pilotes de punta | 12 |
| 4.3. | Losas de cimentación | 12 |
| 5. | SOLUCIONES DE CIMENTACIÓN PARA LOS EDIFICIOS DEL NAIM | 13 |
| 5.1. | Pilotes | 13 |
| 5.2. | Losas de cimentación | 14 |
| 6. | MODELOS Y ANÁLISIS REALIZADOS POR EL DISEÑADOR | 14 |
| 7. | COMPORTAMIENTO OBSERVADO | 15 |
| 7.1. | Cimentación superficial | 17 |
| 8. | CONCLUSIONES..... | 20 |



1. INTRODUCCIÓN

La construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM) se realiza en el predio localizado en la Zona Federal del Lago de Texcoco, aproximadamente a 5 kilómetros del actual aeropuerto de la Ciudad de México. En la Figura 1.1 se puede observar el emplazamiento del NAIM.

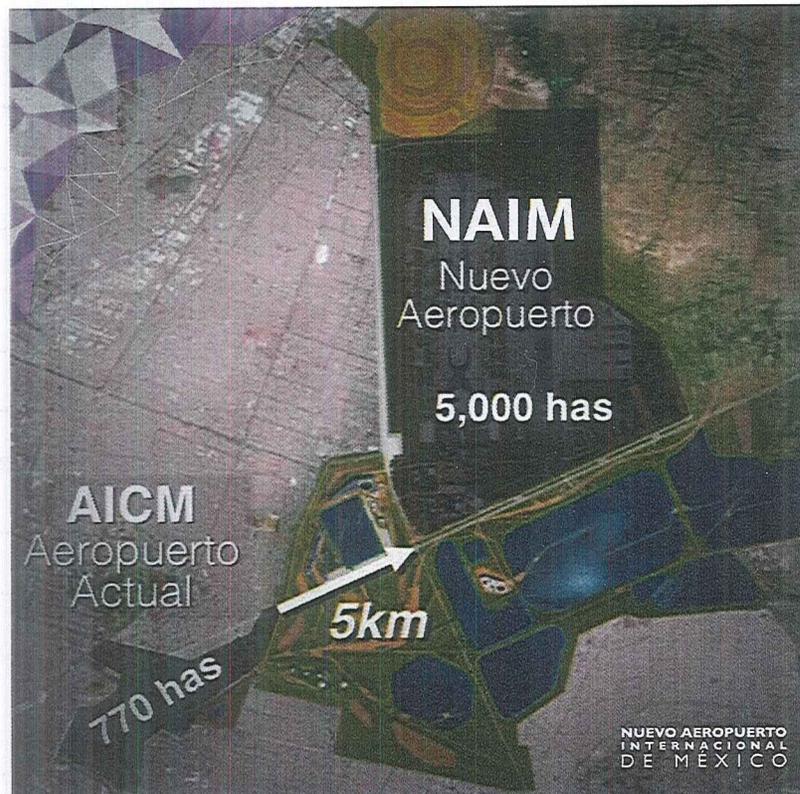


Figura 1.1.- Localización del Nuevo Aeropuerto Internacional de México

El proyecto de construcción del Lado Tierra del Nuevo Aeropuerto contempla los siguientes edificios principales:

- Edificio Terminal de Pasajeros (ETP).
- Centro de Transporte Terrestre Intermodal (CTTI).
- Torre de Control de Tráfico Aéreo (TCTA).

El Edificio Terminal de Pasajeros (ETP) implica la construcción de un complejo estructural de cuatro niveles con una superficie aproximada de 555,000 m². Contempla la construcción de 95 puertas de contacto para aeronaves. Contará con una base envolvente a base de una estructura de malla espacial (ver Figura 1.2), que funcionará como cubierta y permitirá la captación de agua pluvial. Se tiene contemplado que el ETP obtenga la certificación LEED V4 - Platino una vez finalizada su construcción.



Figura 1.2.- Edificio Terminal de Pasajeros

El proyecto del NAIM incluye la construcción del Centro de Transporte Terrestre Intermodal (CTTI), un complejo multi-nivel de cuatro plantas con una superficie total aproximada del orden de 85,000 m². Este edificio será ubicado al sur del ETP (ver Figura 1.3) e integrará un estacionamiento de corta estancia con capacidad aproximada de 5,250 cajones, área de operaciones para conexión de autobuses, áreas comerciales, jardines, marquesinas y tragaluces. La geometría estructural está basada en una retícula de columnas y marcos de acero reforzado con claros del orden de 17 metros. Se contempla que este edificio obtenga la certificación LEED Oro.

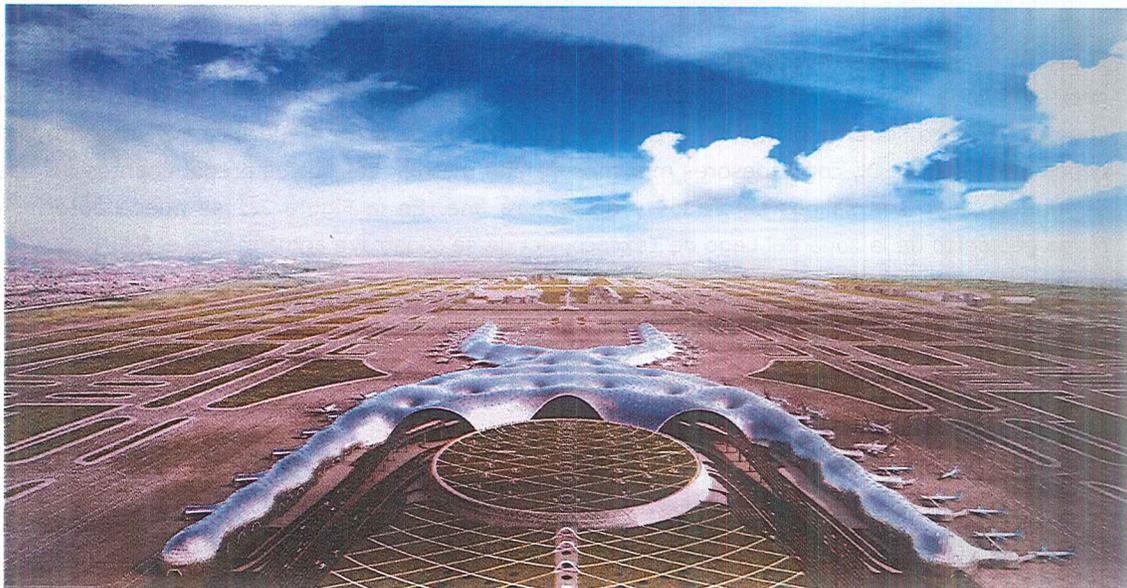


Figura 1.3.- Centro de Transporte Terrestre Intermodal (al sur del ETP)

La Torre de Control es otro edificio icónico del NAIM (Figura 1.4), en el cual se desempeñarán labores fundamentales para la operación del aeródromo, tales como control de la navegación aérea, asignación de aparcamiento de aeronaves y observación de condiciones meteorológicas. La Torre de Control será un edificio concéntrico de geometría monolítica con perfil simple y limpio, coronada por tres niveles acristalados que fungirán como cabina de control.



Figura 1.4.- Torre de Control de Tráfico Aéreo

2. MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO

El predio del NAIM está situado en la zona del antiguo Lago de Texcoco. De acuerdo con el estudio geológico de la Cuenca de México, realizado por Federico Mooser (1996), la superficie lacustre el Lago de Texcoco se formó durante el período Cuaternario de la Era Cenozoica y se constituye de depósitos lacustres Q1, con espesores máximos de 200 metros. Los suelos predominantes del vaso del antiguo lago son salinos saturados y de textura fina. En la Figura 2.1 se puede apreciar el mapa geológico de la zona del Lago de Texcoco, donde se construye actualmente el NAIM.

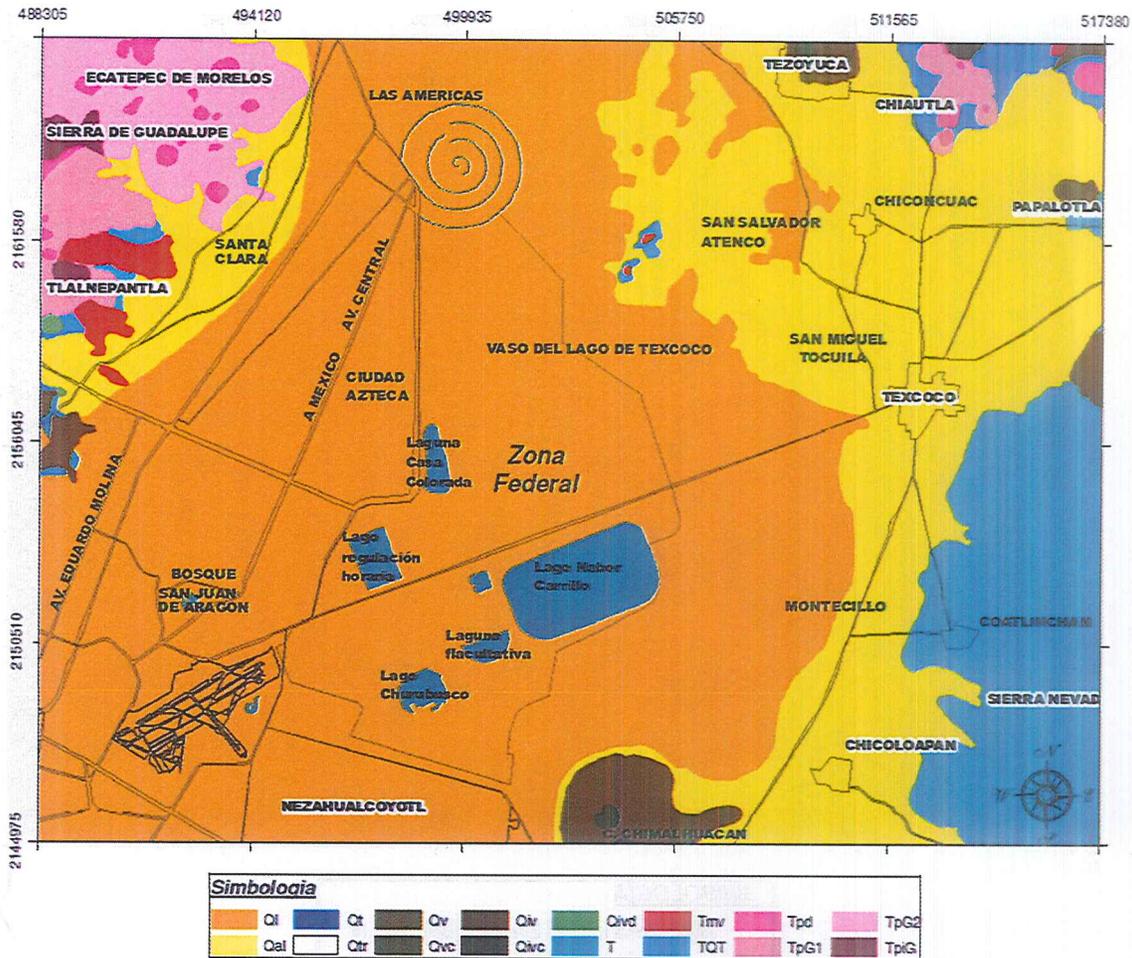


Figura 2.1.- Mapa geológico de la zona del Lago de Texcoco

De acuerdo con el plano de zonificación geotécnica de la Ciudad de México, el sitio donde se construye el NAIM se localiza en la Zona Lacustre (Zona III), ver Figura 2.2. En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, se establece que la Zona III, está "integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m."

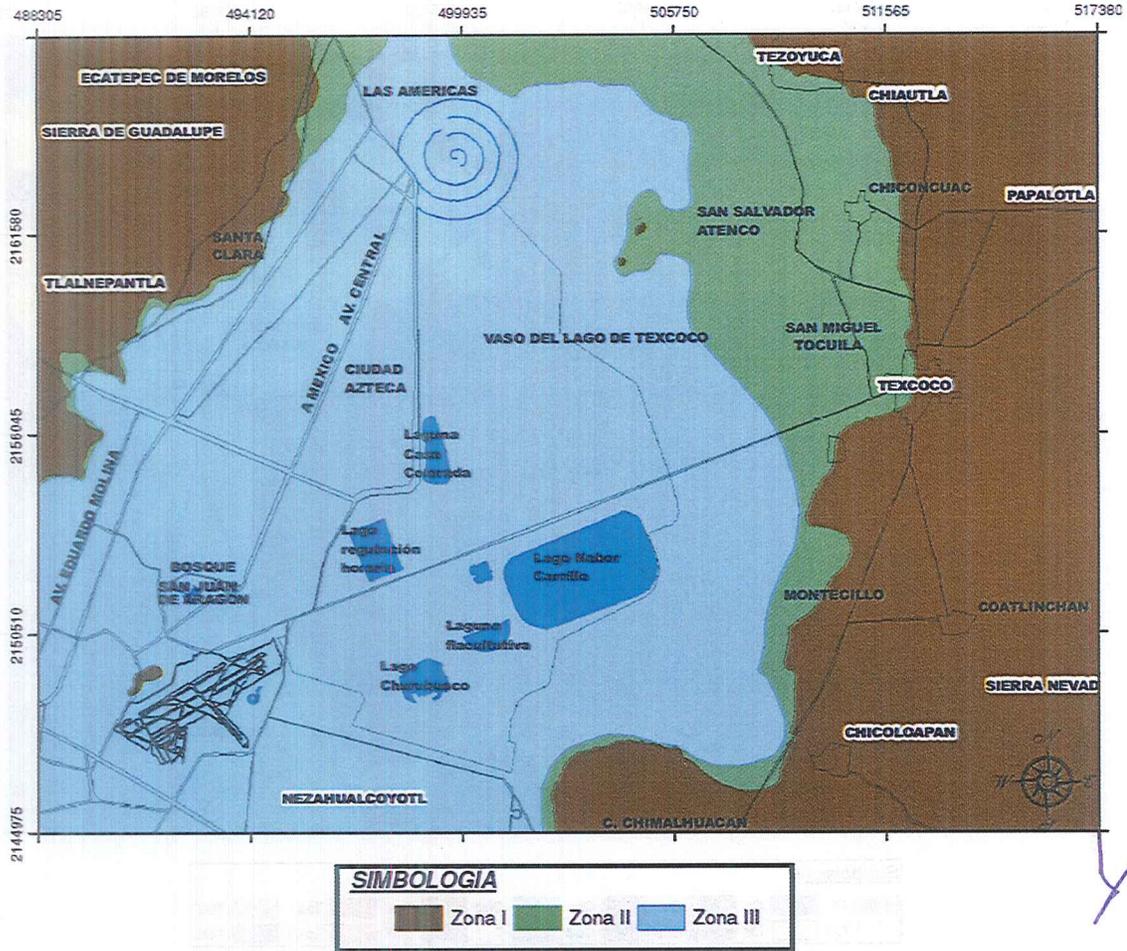


Figura 2.2.- Mapa zonificación geotécnica (2004)

3. CAMPAÑAS GEOTÉCNICAS

A continuación, se exponen de forma breve las campañas que se han realizado, desde la primer propuesta de localización hasta la etapa de diseño ejecutivo.

3.1. REALIZADAS PARA LA ETAPA DE DISEÑO.

La exploración del subsuelo ha sido realizada de forma exhaustiva, el diseñador ha tomado en consideración las investigaciones geotécnicas previas en el sitio de los últimos años. Este conjunto de estudios se enlista a continuación.

- Geotec (2013) para toda la zona del lago de Texcoco. El informe de Geotec (2013) sirvió de información principal para las recomendaciones recogidas en el Premaster plan (Arup 2014).
- UNAM/CFE (2014) para las zonas de prueba.
- GACM encargó a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) llevar a cabo una investigación geotécnica en el área del edificio Terminal en 2015.
- GACM encargó a CFE (2015) realizar una investigación geotécnica durante 2015 y 2016 que cubriera todo el predio del NAICM excepto el edificio Terminal para el Ingeniero Civil Maestro (ICM).
- El Maestro Arquitecto (MA) encargó a Ingeniería Experimental (IE) llevar a cabo la campaña de campo y parte de los ensayos de laboratorio cubriendo las huellas del Edificio Terminal y de la Torre de Control. Los ensayos de sonda suspendida fueron realizados por la empresa GEOvision Inc of Corona, California, EE.UU. El Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó una sonda suspendida en el emplazamiento de la Torre de Control. El programa de ensayos de laboratorio fue suplementado por Fugro of Houston, Texas, EE.UU.
- GACM/Tasana que cubre toda la zona del proyecto.
- Ingeniería Experimental para Arup cubriendo las zonas de la Terminal y la Torre de Control de Tráfico Aéreo.

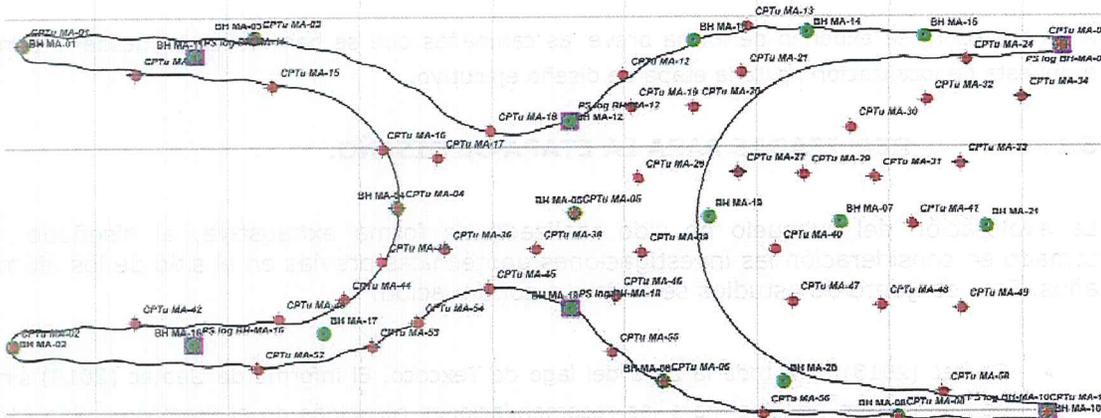


Figura 3.1.- Distribución espacial de sondeos geotécnicos

Para confirmar la caracterización de las condiciones geotécnicas del sitio para el diseño fiable de los sistemas de cimentación de las estructuras del Edificio Terminal, el Centro de Transporte Terrestre y la Torre de Control de Tráfico Aéreo, el diseñador implementó una campaña de sondeos geotécnicos, ensayos de penetración de cono eléctrico y pruebas de sonda suspendida.

3.1.1. Sondeos geotécnicos con muestreo inalterado

Los sondeos se realizaron hasta una profundidad de 50 m dentro de la huella de la Terminal y de 75 m dentro de la huella de la Torre de Control. Los sondeos se realizaron obteniendo un muestreo continuo de las arcillas blandas utilizando un tubo con pared delgada TGC (Santoyo Villa 2010) de 10 cm de diámetro y 1 metro de longitud.

3.1.2. Sondeos de penetración de cono eléctrico

Los ensayos de penetración de cono eléctrico se realizaron de acuerdo con la norma ASTM D 5778-12, hincando el cono a una velocidad de 20 milímetros por segundo. Se tomaron las lecturas de resistencia de la punta, la fricción lateral, la inclinación y la presión de poro cada 20 milímetros. El cono eléctrico estaba equipado con un elemento poroso situado inmediatamente detrás de la punta para medir la presión del agua intersticial (CPTu). Se realizó una pausa en la penetración para medir la tasa de disipación del exceso de presión de agua generada alrededor del cono (prueba de disipación) durante varios de los ensayos de penetración de cono en la Torre de Control, la Terminal y las áreas de las estructuras de estacionamiento.

Handwritten signatures and marks in blue ink, including a large 'A' and several scribbles.

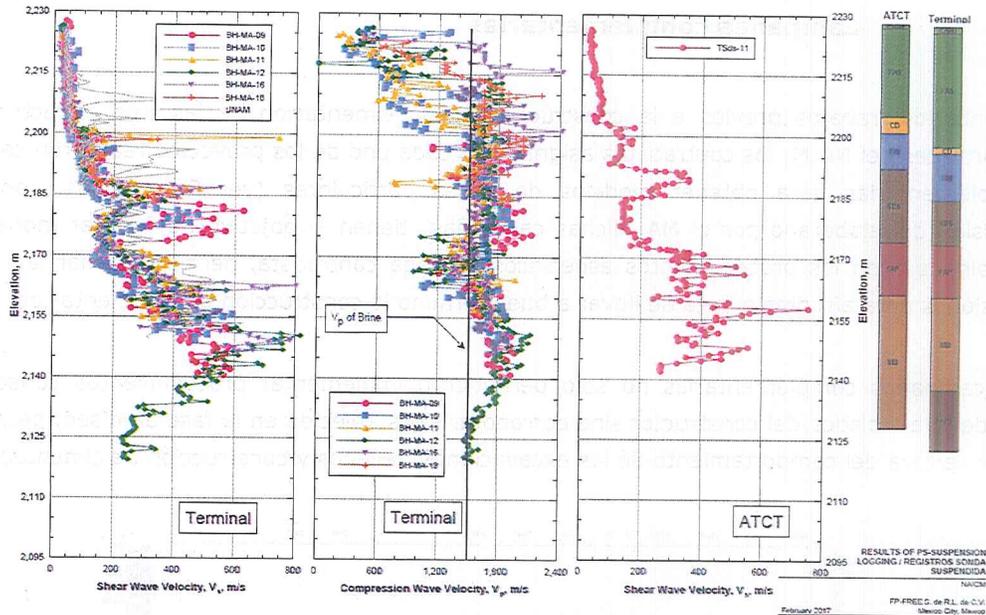


Figura 3.2.- Resultados de sondeos ejecutados

3.1.3. Sondeo de sonda suspendida

Se realizó la medición de la velocidad de la onda de corte con la profundidad mediante un ensayo de sonda suspendida siguiendo los procedimientos recomendados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.1.4. Ensayos de laboratorio

Para evaluar las propiedades índices y mecánicas del suelo se implementó un programa de pruebas de laboratorio que incluyeron:

- Pruebas de consolidación de carga incremental en al menos una muestra tomada de cada sondeo de acuerdo con ASTM D2435.
- Ensayos de compresión triaxial consolidados-no drenados (CU) siguiendo la norma ASTM D2850 y ASTM D4767.
- Ensayos triaxiales cíclicos de conformidad con la norma ASTM D5311 (definidos como Cyclic Stress Rate type, CSR).
- Ensayos de columna resonante para evaluar la curva de degradación, con el fin de evaluar los efectos tixotrópicos en las muestras de arcilla.
- Pruebas del contenido de cloruro (de conformidad con ASTM D1411), del contenido de sulfato (de conformidad con la norma ASTM D516) y del total de sólidos disueltos en 40 lugares donde se realizaron los ensayos mecánicos.

3.2. Campañas complementarias

Durante los trabajos previos a la construcción de la cimentación de las tres estructuras más importantes del NAIM, los contratistas asignadas a cada uno de los proyectos realizaron campañas complementarias para obtener modelos de zonas particulares (ver Figura 3.3), con mayor precisión del elaborado por el MA, dichas campañas tienen el objetivo de generar modelos que combinados con los procedimientos específicos de cada contratista, permiten tomar las mejores decisiones para afrontar el reto de llevar a buen término la construcción de la cimentación.

Las campañas complementarias no solo permitieron implementar procedimientos constructivos acorde a la logística del constructor sino corroborar lo establecido en la fase de diseño, permitiendo tener certeza del comportamiento de las excavaciones, rellenos y construcción de cimentación.

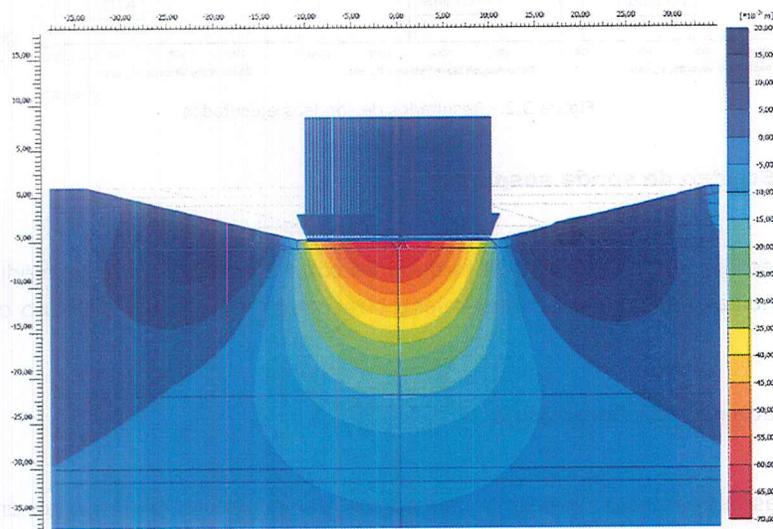


Figura 3.2.- Modelo numérico de la zona de influencia del CTTI

4. SOLUCIONES HABITUALES PARA CIMENTACIÓN DE EDIFICIOS EN EL SUELO DE LA CDMX

4.1. Cajones de cimentación

Los cajones de cimentación (cimentaciones compensadas), Figura 5.1, se pueden utilizar cuando la capacidad de carga del suelo es muy pequeña o se prevén asentamientos excesivos debido al peso de la estructura. Teóricamente, se busca que el peso del suelo extraído sea igual al peso la estructura desplantada, para lograr la compensación de la carga aplicada al terreno.

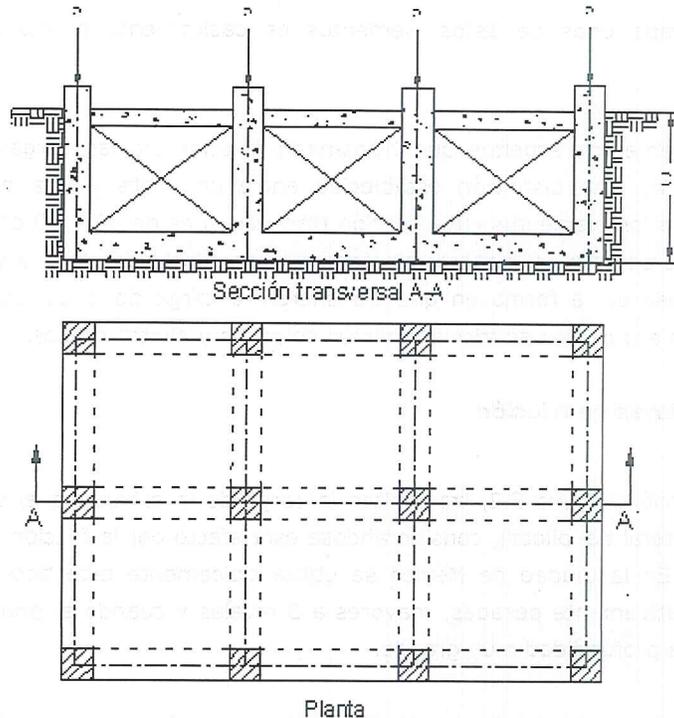


Figura 5.1.- Cajones de cimentación compensada

Típicamente, las cimentaciones de este tipo pueden ser utilizadas para estructuras de cuatro a ocho niveles, para evitar asentamientos en suelos altamente compresibles, ya que al no inducir esfuerzos adicionales al suelo los asentamientos de la estructura son nulos. El costo de este tipo de cimentaciones es superior a las zapatas y a las losas de cimentación, ya que requieren procedimientos constructivos más complejos.

En la Zona de Lago, es conveniente recurrir a cajones de cimentación parcial o totalmente compensados en edificios de hasta ocho niveles. Las cimentaciones compensadas construidas sobre las arcillas blandas del Valle de México muestran que al descargar el suelo con la excavación, se presenta una expansión excesiva en el fondo.

Para evitar que las expansiones sean excesivas o que se presente una falla de fondo, se recomienda realizar la excavación por partes. Cuando las cargas por compensar son grandes se requiere de grandes volúmenes de excavación, por lo que una cimentación compensada resulta muy costosa, en este caso, se recurre a las cimentaciones profundas.

4.2. Pilotes

Las cimentaciones profundas se pueden utilizar con el propósito de transmitir las cargas de una estructura pesada a estratos profundos con alta resistencia al esfuerzo cortante y baja compresibilidad, los cuales subyacen a estratos de arcillas blandas o depósitos de limos o arenas en estado suelto, que poseen alta compresibilidad y baja resistencia. En la zona conurbada de la Ciudad de México, las cimentaciones profundas más comunes son a base de pilotes o de pilas, la

diferencia entre cada uno de estos elementos es básicamente la magnitud de su sección transversal.

Los pilotes son elementos esbeltos que transmiten al subsuelo las cargas de una estructura; actualmente, no hay una distinción establecida entre un pilote y una pila, no obstante, se consideran pilotes a los elementos cuya sección transversal es de 30 a 60 cm. Los pilotes pueden ser de concreto, de acero o de madera; sin embargo los pilotes de madera y de acero se utilizan muy poco. Con base en la forma en que transfieren la carga de la estructura al subsuelo, los pilotes se clasifican en: pilotes de fricción, pilotes de punta y pilotes mixtos.

4.2.1. Pilotes de fricción

Los pilotes de fricción, Figura 5.2, transmiten la carga de la estructura al subsuelo a través del fuste (superficie lateral del pilote), considerándose este efecto por la fricción o adherencia entre el suelo y el pilote. En la Ciudad de México se utiliza típicamente este tipo de cimentación para construcciones relativamente pesadas, mayores a 5 niveles y cuando el primer estrato resistente se encuentra a una profundidad muy grande.

La función principal de este tipo de cimentación es reducir la magnitud de los asentamientos; sólo en construcciones que transmiten a la cimentación incrementos netos por unidad de área muy altos, la necesidad de incrementar la capacidad de carga puede ser prioridad.

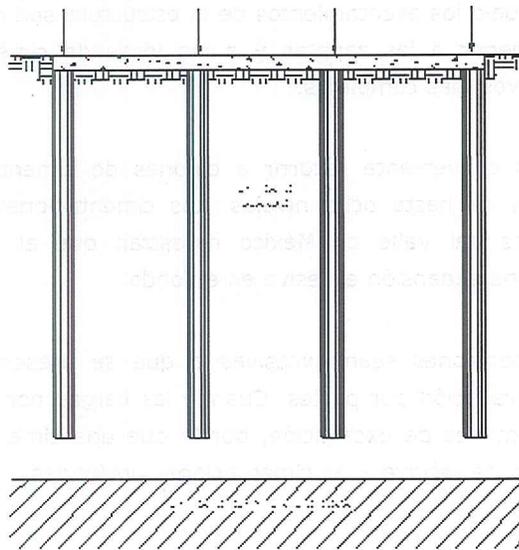


Figura 5.2.- Pilotes de fricción

En el suelo lacustre de la Ciudad de México, es frecuente la combinación de los pilotes de fricción con cimentaciones parcialmente compensadas, con la finalidad de reducir los asentamientos. Para evitar la emersión de las estructuras a consecuencia de la consolidación de los estratos blandos, es necesario que el espacio dejado entre la punta de los pilotes de fricción y la capa dura subyacente sea suficiente para que en ninguna condición puedan llegar a apoyarse sobre esta.

4.2.2. Pilotes de punta

Los pilotes de punta, Figura 5.3, se utilizan para transmitir la carga de una estructura por medio de su punta a un estrato resistente del subsuelo, es decir, trabajan como una columna. En la Ciudad de México, la Torre Latinoamericana es un ejemplo único de un edificio de cuarenta pisos, desplantado en la capa dura con este tipo de cimentación. Posteriormente, a partir de los años 70's, en edificios de más de doce niveles los pilotes de punta se han desplantado generalmente en los depósitos profundos.

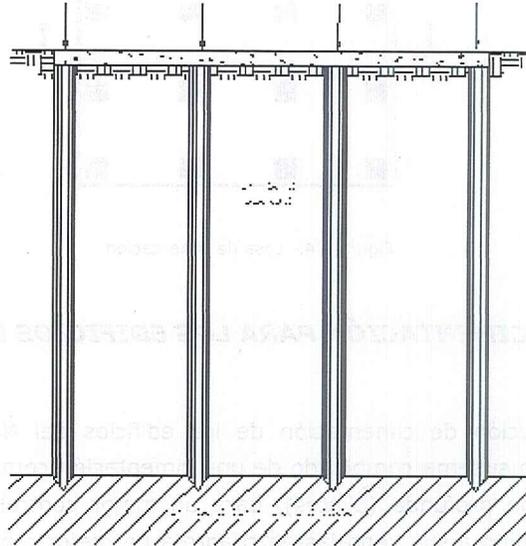


Figura 5.3.- Pilotes de punta

Como consecuencia del hundimiento regional, las estructuras cimentadas con pilotes de punta tienen el inconveniente de mantener su elevación original y no seguir el movimiento descendente del terreno circundante, por lo que se presenta un efecto de emersión, (como el caso de la Columna de la Independencia) ocasionando daños a las estructuras colindantes y las instalaciones de la misma estructura.

4.3. Losas de cimentación

La losa de cimentación son cimentaciones superficiales, este tipo de cimentación se apoya directamente sobre el suelo permitiéndonos la distribución de las cargas de los edificios, puede cubrir toda el área bajo la estructura soportando muros y columnas.

Dentro de esta clasificación se encuentran una gran variedad, pero usualmente se emplean las siguientes:

- Losa de cimentación con espesor uniforme (Figura 5.4)
- Losa de cimentación aligerada

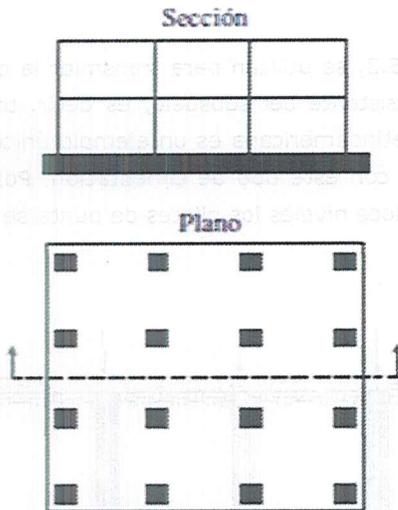


Figura 5.4.- Losa de cimentación

5. SOLUCIONES DE CIMENTACIÓN PARA LOS EDIFICIOS DEL NAIM

Conceptualmente la solución de cimentación de los edificios del NAIM, proporcionada por el diseñador, consiste en un sistema combinado de una cimentación compensada con la inclusión de elementos de cimentación profunda (pilotes), para un mejor control de las deformaciones. Se eligió esta alternativa debido a sus ventajas en cuanto a un mejor reparto uniforme de cargas (al ser una losa continua), la ausencia teórica de hundimientos respecto al terreno natural y el acompañamiento armónico con el hundimiento regional.

5.1. Pilotes

Para todos los edificios del NAIM, se instalaron pilotes de concreto prefabricados y reforzados con cables pretensados. La longitud de estos elementos de concreto fue variable, de 14 a 22 metros, en función de las zonas en donde fueron instalados.

Tabla 5.1.- Pilotes por edificio

| Edificio | Pilotes |
|--------------------------------|---------|
| Edificio Terminal de Pasajeros | 5,567 |
| Centro de Transporte Terrestre | 1,114 |
| Torre de Control | 492 |
| Área Frontal Lado Tierra | 1862 |

En la Figura 5.1, se puede observar una planta de conjunto de los pilotes instalados en la huella de los diferentes edificios.

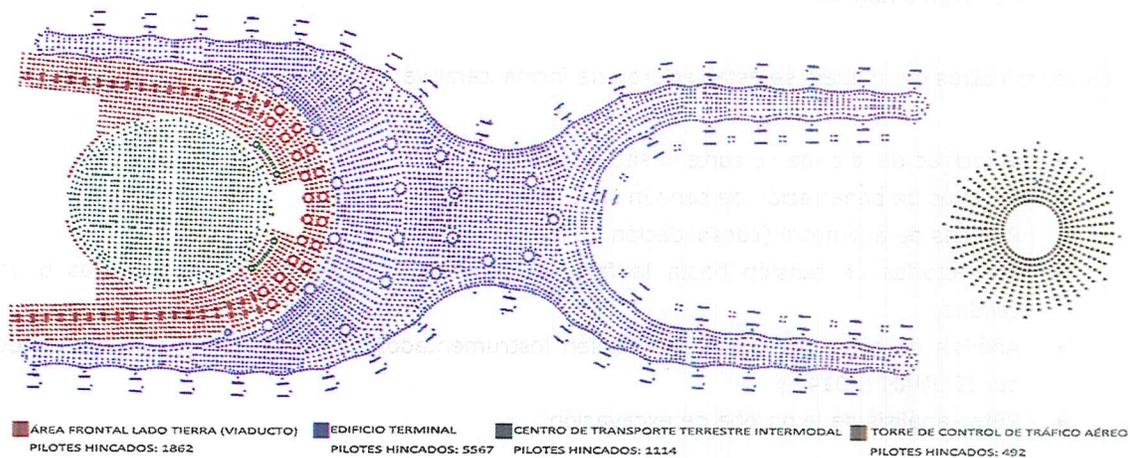


Figura 5.1.- Distribución espacial de pilotes en el NAIM

5.2. Losas de cimentación

Para el Edificio Terminal, el Centro de Transporte y la Torre de Control, se instruyó por parte del diseñador la construcción de una losa de concreto reforzado, de espesor variable entre 1 y 1.50 metros, en función de la zona de implementación. Para la instalación de las losas fue requerido realizar una excavación del orden de 6 metros para alcanzar el nivel de proyecto. La profundidad de excavación fue fijada con el propósito de que el sistema de cimentación tuviera una compensación del peso retirado del suelo contra el peso que soportara el terreno una vez construidos los edificios.

6. MODELOS Y ANÁLISIS REALIZADOS POR EL DISEÑADOR

El diseñador utilizó el programa de elementos finitos Plaxis 2D y 3D (Brinkgreve, Engin, and Swolfs) para evaluar el comportamiento estático de la cimentación, utilizando modelos bidimensionales y tridimensionales de medio continuo. El modelo de suelo genérico elegido para representar al suelo en los cálculos en el estado límite de servicio en Plaxis fue el modelo Hardening Soil Model with Small Strain Stiffness (HS small) (Benz 2007; Schanz, Vermeer, and Bonnier 1999). Las principales razones para la selección de este modelo son:

- Se trata de una plataforma de análisis numérico reconocida internacionalmente citada en varias publicaciones por terceros.
- Produce una predicción fiable de los desplazamientos en el estado límite de servicio, como resultado de la utilización de un modelo de suelo no lineal que tiene en cuenta la variación en el módulo de corte con un aumento en la deformación a cortante, cambios en la tensión efectiva media y trayectorias de tensiones.
- Puede ser utilizado para una amplia gama de suelos.
- Reconoce los cambios en la dirección de la deformación.

- Permite el comportamiento de consolidación acoplado, lo que permite que se calculen las propiedades actuales y futuras de forma explícita.
- Permite que se transfieran fácilmente los parámetros estáticos a sísmicos y a otros casos de carga dinámica.

Los parámetros del modelo se establecieron de forma iterativa utilizando los siguientes datos:

- Velocidad de la onda de corte in situ de la sonda suspendida;
- Ensayos de penetración de cono in situ;
- Pruebas de edómetro (consolidación 1D);
- Trayectorias de tensión hasta la falla en pruebas de laboratorio con muestras buena calidad;
- Análisis de construcciones de terraplén instrumentados de ensayos recientes reportados por II UNAM (2014) y
- Retro-análisis de la prueba de excavación.

7. COMPORTAMIENTO OBSERVADO

En obra se está llevando un monitoreo topográfico permanente de los hundimientos que se presentan en las cimentaciones de cada uno de los edificios, plataformas comerciales, pistas, etc. En general, el comportamiento ha resultado mejor de lo previsto desde el diseño. Se pone especial atención a la transición entre la cimentación del Edificio Terminal de Pasajero y las plataformas, mediante el método observacional durante la construcción de estas últimas.

Las pruebas de carga estática realizadas recientemente a pilotes seleccionados por el diseñador, corroboran que ofrecen una capacidad de carga de más de 500 kN (ver Figura 6.1). Además, la función que desarrollan estos elementos profundos es la de reducir la magnitud de los asentamientos del sistema compensado de cimentación. Cabe destacar que el diseñador considero una carga admisible de 410 kN.



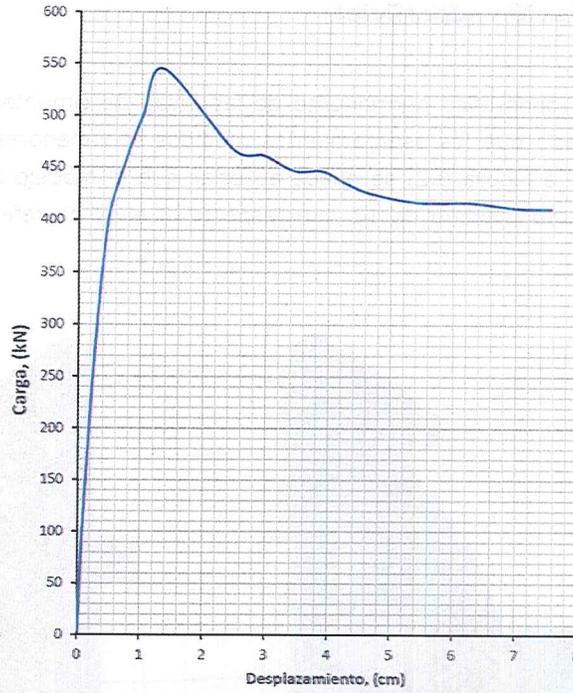


Figura 6.1.- Resultado típico de prueba de carga en pilotes

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten mark]

[Handwritten mark]

7.1. Cimentación superficial

Mediante el monitoreo topográfico permanente de las losas de cimentación de cada uno de los edificios, se ha observado que los asentamientos medidos son menores a los estimados en los modelos numéricos. En la Figura 6.2, se puede apreciar que el modelo digital de asentamientos, reporta un desplazamiento máximo de 12 cm respecto al nivel de referencia, mejor al previsto teóricamente.

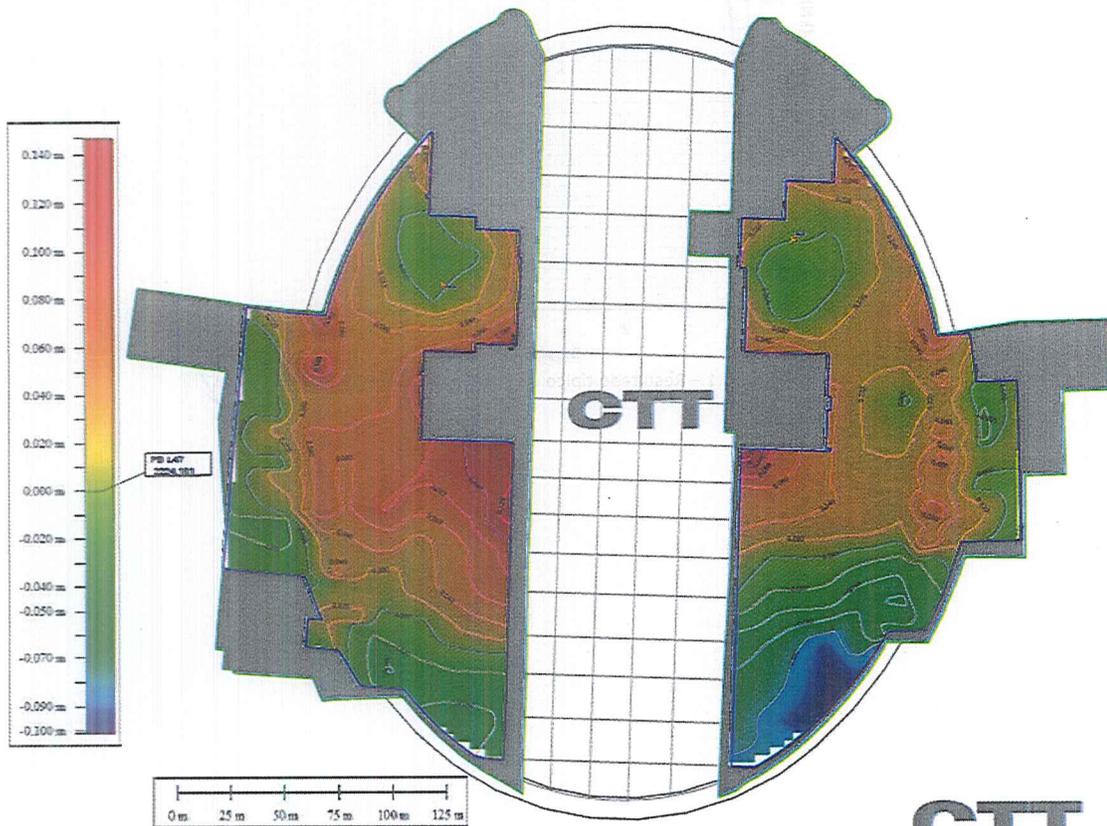


Figura 6.2.- Curvas de igual hundimiento en el CTTI

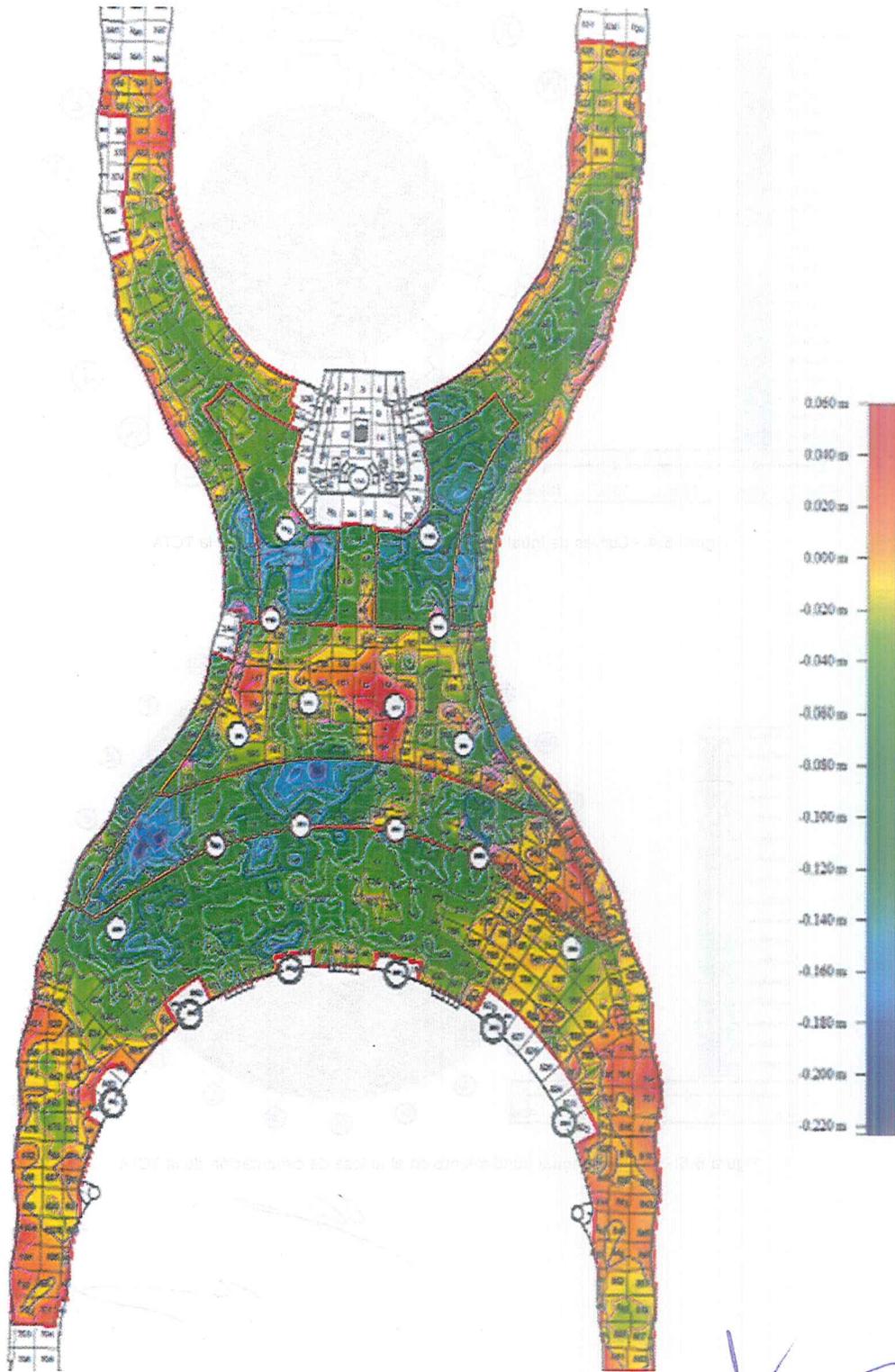


Figura 6.3.- Curvas de igual hundimiento en el ETP

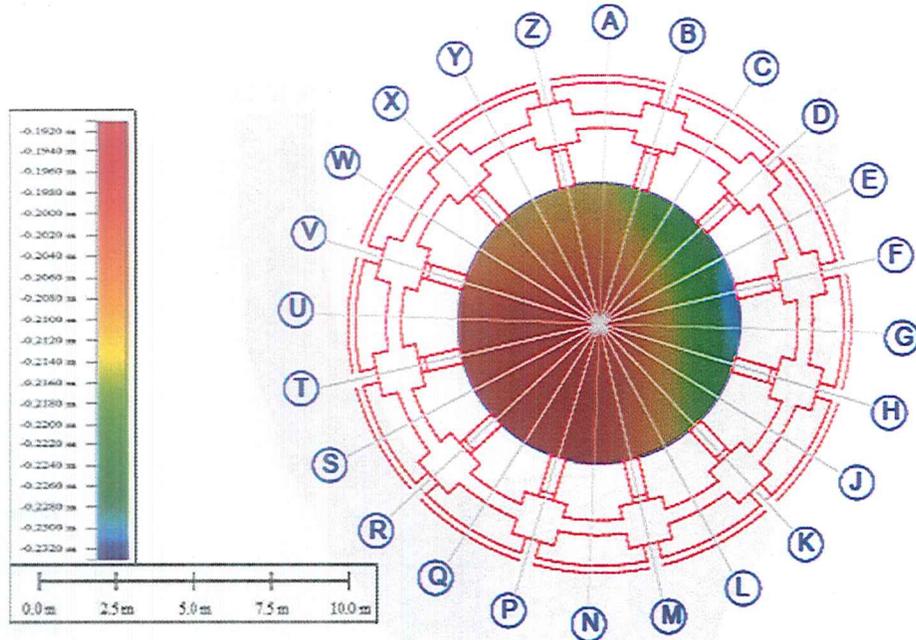


Figura 6.4.- Curvas de igual hundimiento en el núcleo central de la TCTA

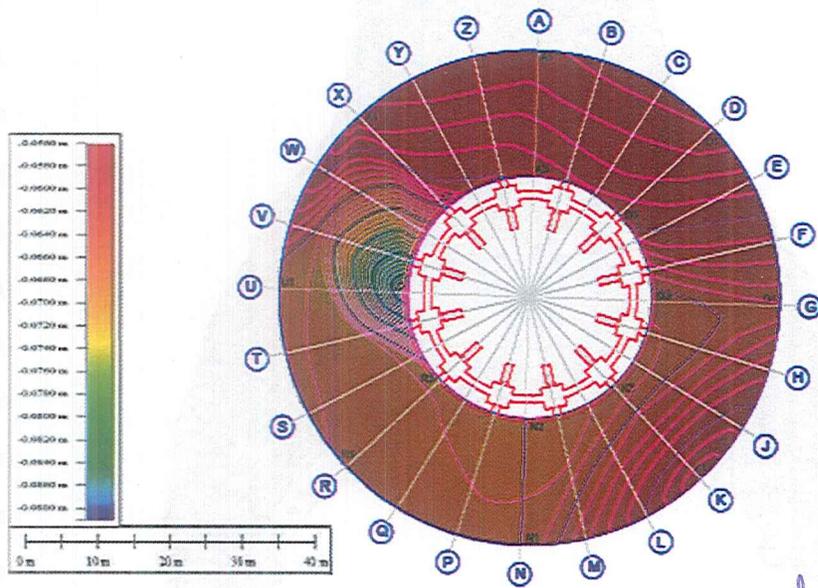


Figura 6.5.- Curvas de igual hundimiento en el la losa de cimentación de la TCTA

Handwritten signatures and marks in blue ink.

8. CONCLUSIONES

- La solución de cimentación prevista en proyecto es la que se podrá adaptar mejor al tipo de edificación y al tipo de terreno. Este tipo de cimentación es el más utilizado en los últimos 40 años en la zona del Valle de México, por su adaptabilidad a la subsidencia regional.
- En general, el modelo numérico de proyecto, empleado para la estimación de hundimientos, representa el comportamiento esperado del suelo. El coeficiente de permeabilidad y la rigidez del suelo concuerdan con la tasa de subsidencia regional.
- Los resultados obtenidos en las campañas geotécnicas durante el desarrollo del diseño ejecutivo han sido comprobados por los trabajos complementarios de cada contratista involucrado.
- Los sistemas de cimentación previstos por el diseñador a partir de las soluciones habituales en la región, combinadas con la modelación y los análisis realizados ha presentado un comportamiento adecuado, de acuerdo con las mediciones obtenidas por el monitoreo permanente.
- Los procedimientos constructivos y el seguimiento adecuado del proceso de construcción (monitoreo) han demostrado la efectividad de la solución de cimentación, reduciendo los hundimientos algo más de los esperado respecto a los resultados de los modelos teóricos.
- Se prevé que el comportamiento de la cimentación garantice la estabilidad de la estructura a corto, mediano y largo plazo, presentando deformaciones uniformes.

