



5.k Tramos de prueba para las soluciones de las pistas, plataformas y calles de rodaje

5.k.1 Resumen

El terreno donde se construirá el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se localiza en la zona del ex-Lago de Texcoco. Por exploraciones previas y las realizadas a finales de 2012 y principios de 2013 para este proyecto, se sabe que en toda esa zona existen suelos lacustres muy compresibles y de baja resistencia; y que en la zona prevalece un ambiente muy marcado de hundimiento regional. Completa la difícil situación y reto de construir en la zona, la ocurrencia de sismos intensos. Así, el proyecto exige precauciones especiales para la pertinente toma de decisiones por lo que respecta a las técnicas que deben adoptarse para la construcción de instalaciones aeroportuarias, como las que se prevén para esta moderna obra de infraestructura. Más aún, la información proveniente de la campaña de exploración y muestreo realizada a finales de 2012 y principios de 2013, indica que las condiciones estratigráficas del sitio distan de ser homogéneas. Si a la variabilidad del subsuelo se agregan las irregularidades topográficas del terreno, cruces de canales, hondonadas, promontorios, y otras discontinuidades tales como agrietamientos del terreno, puede entenderse que sea necesario recurrir a diferentes tratamientos del terreno, a fin de soportar convenientemente aeropistas, calles de rodaje, plataformas y edificios.

A partir de recomendaciones del II-UNAM, ASA ha considerado que es necesaria la realización de tramos de prueba que permitan la observación directa y la evaluación cualitativa y cuantitativa del comportamiento de las distintas soluciones conceptuales propuestas, así como la calibración de modelos teóricos en la zona donde se ubicarán las pistas del NAICM.

Los tramos de prueba se construirán en la cercanía de la cabecera sur de la pista 4, en donde se evaluarán las potenciales soluciones siguientes: a) tramo de prueba de referencia (sin tratamiento alguno), b) compensación parcial, c) precarga con drenes verticales (de arena y artificiales –wickdrains-), d) inclusiones rígidas, e) terraplén estructural piloteado, y f) celdas estructuradas de muros y losa de concreto reforzado. La justificación de su construcción se presenta en la Nota Técnica No. GE-7, en la que se concluye que es estrictamente indispensable construir todos estos terraplenes o tramos, ya que no se vislumbra una solución única, ya que se enfrentarán condiciones muy diversas, lo que podría requerir el concurso de varias de estas técnicas. En la Nota Técnica No. GE-2 se describen con detalle estas técnicas; en este inciso sólo se presenta un compendio. Dada la importancia de medir y registrar el comportamiento de estas técnicas, se llevará a cabo su instrumentación geotécnica, para lo que se han preparado las especificaciones correspondientes, mismas que se incluyen en la Nota Técnica No. GE-8.



5.k.2 ¿Por qué construir tramos de prueba?

Como parte de los estudios técnicos que realizará la SCT/DGAC, a través de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), para “Resolver la problemática del transporte aéreo en el centro del país” de manera previa a la licitación pública internacional para realizar el diseño y construcción de un nuevo aeropuerto internacional en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), es necesario efectuar estudios complementarios de tipo geotécnico y estructural. Lo anterior tiene por objeto dar cumplimiento a la Ley de Aeropuertos y su Reglamento, así como proporcionar a los licitantes información técnica suficiente respecto a las condiciones del terreno y subsuelo en el mencionado futuro aeropuerto.

El terreno se localiza en la zona del ex-Lago de Texcoco. Se sabe que en toda esa zona existen suelos lacustres muy compresibles y de baja resistencia que requieren precauciones especiales para la construcción de las instalaciones aeroportuarias que se proyectan. La dificultad de cimentar aeropistas, calles de rodaje, plataformas, edificaciones, tanques de almacenamiento de combustible y muchas otras obras tales como túneles, alcantarillas, desplante de grandes tuberías de drenaje, vialidades y muchas otras instalaciones, se magnifica porque la zona está sometida a un fuerte hundimiento regional, además de la frecuente ocurrencia de sismos intensos.

En un estudio de diagnóstico realizado por el Instituto de Ingeniería (2011) con la información entonces disponible, se examinaron las problemáticas anteriores y se pudo confirmar que desde el punto de vista geotécnico y estructural existe plena seguridad en cuanto a la factibilidad de construir el aeropuerto en el sitio considerado. Sin embargo, se recomendó la realización de una serie de estudios específicos adicionales previos a cualquier licitación para definir con mayor precisión las condiciones del sitio y las mejores técnicas de construcción de las diferentes estructuras.

A partir de estas recomendaciones, ASA ha considerado que es necesaria la realización de tramos de prueba que permitan la observación directa y la evaluación cualitativa y cuantitativa del comportamiento de las distintas soluciones conceptuales propuestas en estudios previos por el II-UNAM, así como la calibración de modelos teóricos en la zona donde se ubicarán las pistas del NAICM. Así, los objetivos y las metas específicas que se persiguen en los tramos de prueba por construir, son los siguientes:

- Evaluación de los procedimientos constructivos.
- Observación directa y evaluación cualitativa del comportamiento de los tramos de prueba.
- Calibración de modelos teóricos y evaluación cuantitativa de los tramos de prueba.



- Evaluación del comportamiento de los pavimentos en presencia de los hundimientos asociados a las diferentes soluciones.

La construcción de los tramos de prueba citados y el seguimiento de su comportamiento posterior mediante la observación instrumental permitirá evaluar la factibilidad de aplicar tales soluciones no sólo en las pistas sino en calles de rodaje y plataformas. Es previsible que sea necesaria una combinación de distintas soluciones de cimentación en función de la topografía del terreno y de las características estratigráficas particulares en el sitio. El diseño de pasos a desnivel o el de vialidades de acceso de pasajeros, carga y otros insumos y el de otras obras como las de infraestructura hidráulica para el drenaje interno del recinto aeroportuario también se beneficiará del estudio de estos tramos de prueba.

Las soluciones a base de celdas estructuradas, inclusiones rígidas, drenes de arena con y sin precarga así como los terraplenes estructurados piloteados también podrán aplicarse para cimentar o para mejorar el subsuelo bajo muchas otras estructuras que necesariamente se construirán para el nuevo aeropuerto. La selección del procedimiento de mejora del subsuelo o del método óptimo para cimentarlas se beneficiará de los resultados que se obtengan con los tramos de prueba. Esta inversión redundará en diseños mejor sustentados, más seguros y más económicos. Las estructuras en donde se considerarán estas opciones de cimentación son los edificios terminales, los de estacionamientos, los tanques de almacenamiento de combustibles. También se beneficiarán de los resultados de los tramos de prueba las estructuras especiales como las que se requieran para alojar los sistemas de ayuda a la navegación aérea y la torre de control. Cabe puntualizar que con base en la información actualmente disponible, no es posible descartar el estudio mediante tramos de prueba de ninguna de las soluciones propuestas, en tanto no se sometan al proceso de evaluación previsto para cada una de ellas; ello así se reconoce en la Nota Técnica No. GE-7.

La construcción de tramos de prueba tiene también un importante componente didáctico y de investigación a largo plazo, de gran beneficio para la ingeniería práctica. En efecto, la zona se convertirá en un valioso campo de pruebas (Mendoza, 2010) que permitirá estudiar el comportamiento real de los terraplenes y tramos de pruebas ya mencionados, así como de otras obras térreas; y que ofrecerá la oportunidad de poner a prueba los desarrollos teóricos y numéricos del análisis geotécnico. La posibilidad de contrastar las predicciones y previsiones teóricas y numéricas cuantitativas del comportamiento de las cimentaciones y demás obras térreas, con las mediciones que la instrumentación geotécnica realice, permitirá dar avances significativos a la ingeniería geotécnica mexicana.

Países tales como Inglaterra, EUA, Suecia, Noruega, Francia y Japón, tienen desde hace varias décadas, la posibilidad de cerrar el ciclo completo y ganar en múltiples lecciones y enseñanzas, no sólo porque cuentan con campos de prueba, sino porque también practican la sana tarea de instrumentar y observar cimentaciones y prototipos térreos. En efecto, los países más avanzados en el campo de la ingeniería geotécnica



cuentan con campos de pruebas en donde sus capacidades de análisis se sustentan con la verificación experimental en obras a escala natural.

Cabe mencionar la experiencia sueca al respecto. El Instituto Geotécnico Sueco (SGI) llevó a cabo una prueba de carga en el campo en 1945, cerca de la villa llamada Väsby, a unos 30 km al norte de Estocolmo, en conexión con la selección de un sitio para construir un aeropuerto; el sitio está caracterizado por estratos arcillosos de 10 a 15 m de espesor, que descansan sobre una formación rocosa. Con ello se inició posiblemente el primer sitio histórico con el campo más grande de pruebas en el mundo, orientado a comparar los datos medidos, con las predicciones que arroja la teoría clásica de consolidación de Terzaghi, junto con las suposiciones convencionales que generalmente son aceptadas en la práctica de la ingeniería. El proyecto del aeropuerto fue finalmente ubicado en el sitio actual de Arlanda, pero siguiendo la sugerencia del propio Karl Terzaghi, quien fungió como consultor del proyecto, las observaciones y mediciones de los campos de prueba continuaron, lo que ocurre hasta la fecha. Las mediciones que se realizan (Chang, 1981) han permitido revisar la validez de esa teoría, mostrando la importancia de la consolidación secundaria.

En 1957, otra prueba de carga se inició en Skå-Edeby, a 25 km al oeste de Estocolmo, nuevamente en conexión con la búsqueda del sitio para un aeropuerto, que tampoco se concretó ahí. Contando con estos dos sitios en donde prueban desarrollos innovadores, los ingenieros geotecnistas suecos han podido avanzar considerablemente en la comprensión del comportamiento de terraplenes y en el uso de materiales ligeros, mejoramiento masivo de suelos, uso de drenes verticales artificiales, técnicas de exploración y muestreo, cimentaciones piloteadas, etc. En México, sólo en el campo de las presas se ha tenido un desarrollo similar; ejemplo de ello es el trabajo de Marsal y Ramírez de Arellano (1967).

5.k.3 Ubicación de los tramos de prueba

Atendiendo a lo establecido en el alcance k: Tramos de prueba para las soluciones de las pistas, plataformas y calles de rodaje, del Convenio de Colaboración ASA-UNAM-13-002, personal académico y técnico del Instituto de Ingeniería, UNAM se dio a la tarea de estudiar dos posibles campos para emplazar los tramos de prueba.

En la Nota Técnica No. GE-2, todavía se mencionaba para su estudio a un campo al sur y en las inmediaciones de la cabecera sur de la pista 36R, pero al norte del camino y canal que se encuentran en dirección E-W, y casi perpendiculares al camino principal de acceso a la zona. Tiempo después, ASA estableció en la reunión técnica del 18 de diciembre, 2013, la conveniencia de replantear las dimensiones, combinaciones de tramos de prueba y en general de optimar recursos y reducir, sin menoscabo de los alcances y objetivos de los estudios experimentales, los campos de prueba por estudiar.



Fue así como del alcance para el estudio de dos campos o polígonos de prueba se concluyó y acordó la pertinencia de concentrar todos los tramos de prueba con todas las soluciones propuestas (véase la Nota Técnica No. GE-7) en un solo campo o polígono de pruebas, para lo que se emitió la Adenda a la Nota Técnica No. GE-2.

En dicha Adenda a la Nota Técnica No. GE-2 se describe por primera vez el nuevo arreglo y dimensiones de todos los tramos o terraplenes de prueba (véase la Fig 4.1 de ese documento). En notas técnicas subsecuentes se reiteran los cambios antes mencionados; es así como en la planta general de NAICM, se localiza el campo de pruebas; véanse las Figs 2 y 3 de la Nota Técnica No. GE-4, y también la Fig 1 de la Nota Técnica No. GE-6.

En lo subsecuente de este inciso, se presenta una descripción general de los tramos de prueba, toda vez que sus detalles se incluyen en la Nota Técnica No. GE-2 y la Adenda a la misma. Se presenta también una descripción general de la instrumentación geotécnica que habrá de instalarse en los diversos tramos de prueba, reuniendo tanto sus detalles como los procedimientos de instalación en la Nota Técnica No. GE-8.

Los tramos de prueba se construirán en la cercanía de la cabecera sur de la pista 4 (36R-18L), tal como se muestra en las Figuras 5.k.1 y 5.k.2, en donde se evaluarán las potenciales soluciones siguientes: a) tramo de prueba de referencia (sin tratamiento alguno), b) compensación parcial, c) precarga con drenes verticales (de arena y artificiales –wickdrains-), d) inclusiones rígidas, e) terraplén estructural piloteado, y f) celdas estructuradas de muros y losa de concreto reforzado.

La ubicación del campo de prueba atiende a un área en la que por la trayectoria de aproximación de las aeronaves, las construcciones están muy restringidas en su altura. Así, se considera como muy propio ubicar el campo o polígono de pruebas en un área en donde prácticamente están vedadas las construcciones. Con ello se sientan las bases para poder cumplir con la intención de llevar a cabo el monitoreo de esos tramos de prueba en un horizonte, verdaderamente a largo plazo; en efecto, los terraplenes que no rebasan el par de metros de altura, estarán contruidos en donde se asegure su presencia, ante la indispensable ausencia de cualquier construcción que se proyecte sobre el nivel del terreno.

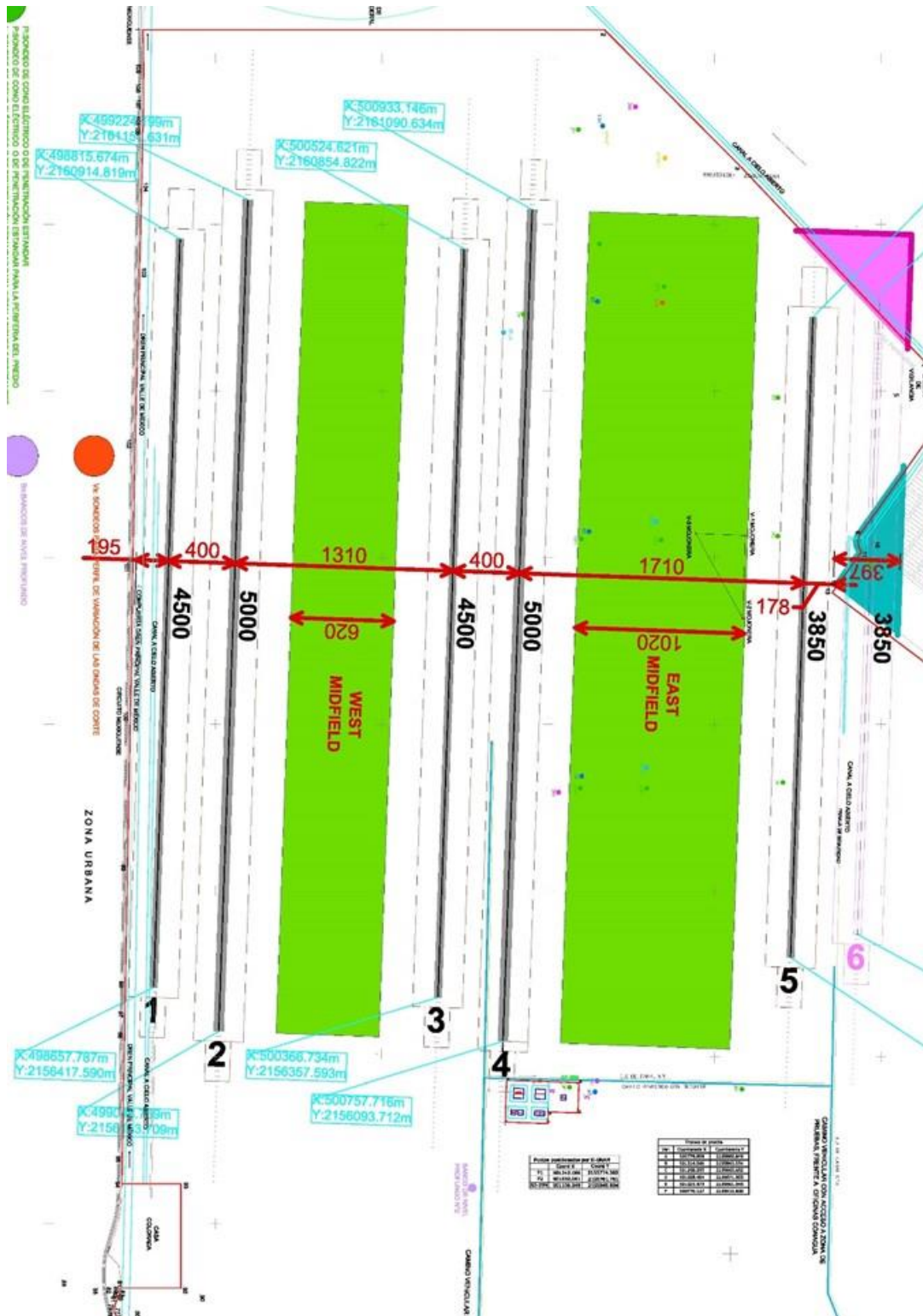


Fig 5.k.1 Ubicación de los tramos de prueba en la planta general

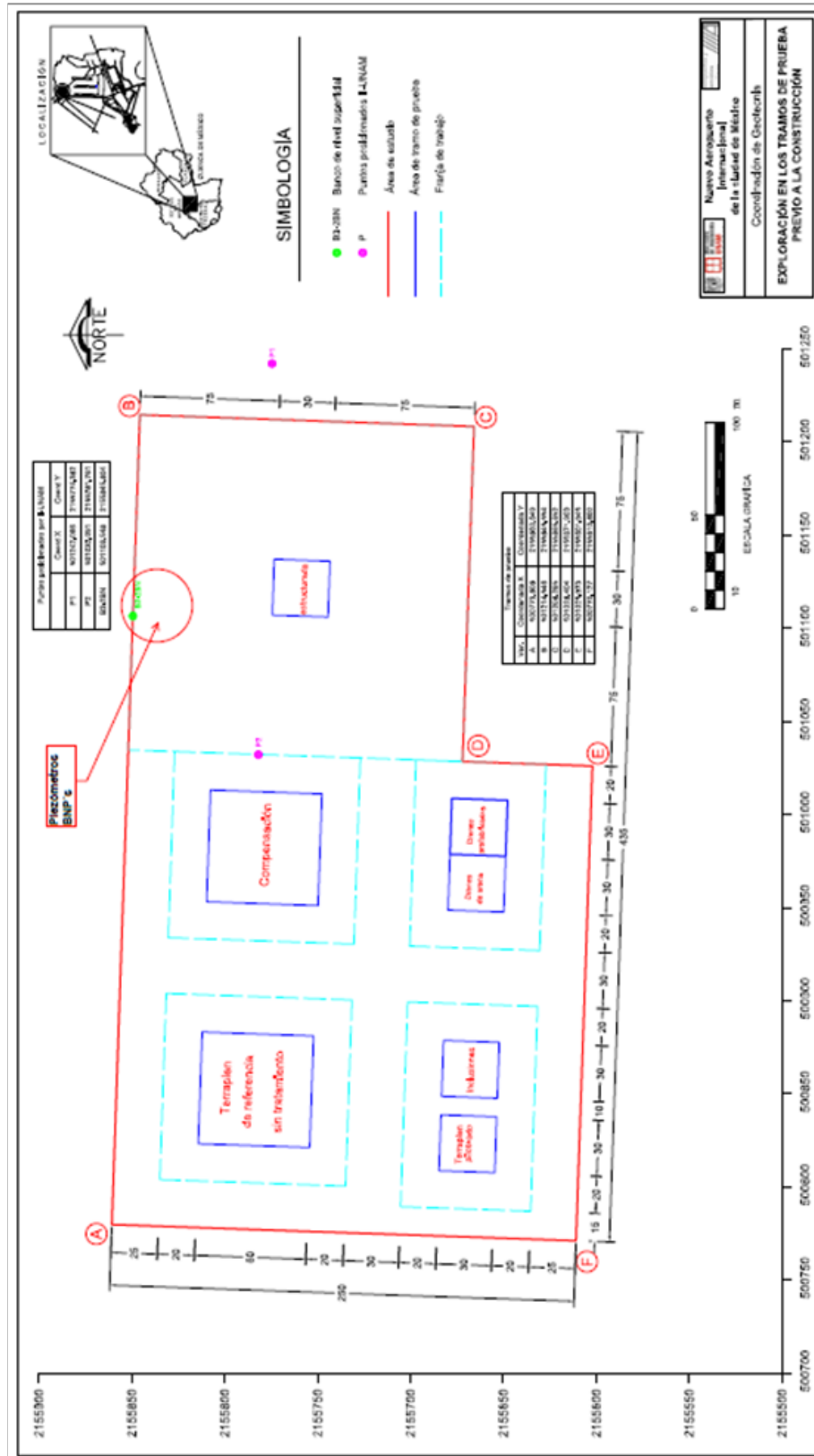


Fig 5.k.2 Planta general del polígono de tramos de prueba.

5.k.4 Descripción de los tramos de prueba

5.k.4.1 Tramo de prueba de referencia (sin tratamiento)

El objetivo primordial de la construcción y observación de un tramo de prueba de referencia es poner en evidencia los asentamientos y las deformaciones de los terraplenes de las pistas en ausencia de mejoramiento del subsuelo. Permitirá entonces tener una referencia y poder comparar ese comportamiento con el que presenten los otros tramos de prueba construidos con diversos tratamientos.

En la Fig 5.k.3 se presenta una planta del terraplén de referencia de 60 m x 60 m, y 2.1 m de altura, en la que están indicadas las referencias topográficas y diferentes instrumentos geotécnicos, con los que se pretende medir no sólo los efectos, tales como los asentamientos y los desplazamientos laterales que sufra, tanto en la superficie del terreno como a profundidad, si no también las causas; esto es, presiones verticales en el contacto terreno-terraplén, así como la presión de poro en el agua del subsuelo.

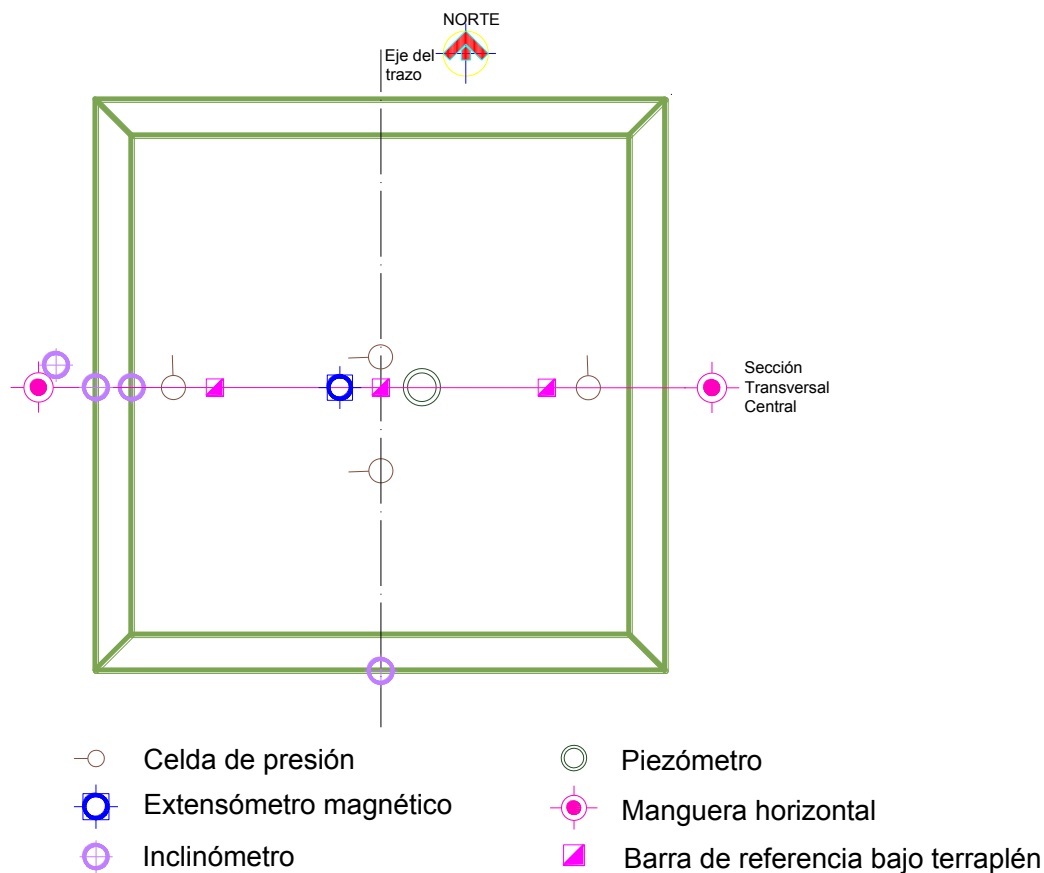


Fig 5.k.3 Esquema en planta de la instrumentación del terraplén de referencia



Los asentamientos se registrarán topográficamente siguiendo los movimientos de referencias superficiales que formarán una retícula en todo el área de estudio, no sólo en el terraplén de referencia. Tales nivelaciones topográficas tomarán como referencia un nivel profundo localizado a 100 m de profundidad y que a su vez estará referenciado a un banco fijo bien conocido como es el de Atzacalco y/o el Peñón de los Baños.

La instrumentación está orientada para monitorear los asentamientos superficiales y también a diversas profundidades. Los primeros son para conocer las deformaciones superficiales del pavimento y los segundos para conocer las contribuciones de los diferentes estratos al asentamiento total de la superficie. La contribución de los asentamientos a profundidad se hará mediante extensómetros de placas y arañas, comúnmente denominados extensómetros magnéticos.

De particular interés resultará el conocimiento de la configuración de la deformación en la base de un terraplén y su evolución desde el inicio de su construcción; esto es, la definición del perfil de asentamientos. Para ello se coloca en el desplante de un terraplén, antes de su construcción, una manguera flexible para medir los asentamientos que sufra el terreno de cimentación. Al llenar con agua esta manguera y conociendo el nivel de ésta (vasos comunicantes) con sus menisco extremos, la posición vertical de cualquier segmento de la manguera se puede ubicar conociendo la presión en el agua, al deslizar un sensor de presión hidráulica a través de la manguera.

Los desplazamientos laterales que sufra el subsuelo debido a la carga que impongan los terraplenes, se registrarán mediante inclinómetros verticales dispuestos en la periferia de cada tramo de prueba. Para ello, se instalarán tuberías para inclinómetros a una profundidad de instalación a partir de la Primera Capa Dura.

Para conocer las condiciones hidráulicas actuales y la evolución de la presión de poro debido a las cargas impuestas por la construcción de los tramos de prueba y su disipación con el tiempo, se instalará una estación piezométrica de referencia para todo el campo de pruebas, esto es en campo libre; así como también otras estaciones piezométricas particulares para cada tramo de prueba, incluyendo la de este terraplén de referencia.

5.k.4.2 Solución a base de compensación parcial

La función de la solución compensada es la de aproximar a cero el incremento neto de presión sobre el suelo debida a una sobrecarga superficial, usando el principio de compensación de masas en términos de esfuerzos efectivos. Para lograr lo anterior es necesario realizar una excavación y rellenarla en la porción central con materiales más ligeros que el suelo natural. Con el fin de reducir los asentamientos diferenciales transversales, conservar la geometría original (pendiente transversal) del perfil de suelo intervenido. Finalmente, con el propósito de conservar la sección transversal, los extremos de dicha excavación se rellenan con materiales más pesados.

Además, para la construcción de las pistas, plataformas y calles de rodaje del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México, deberán realizarse en algunos casos rellenos de espesor variable que generarán asentamientos importantes; debido a la alta compresibilidad del suelo de la zona, por lo tanto es imperiosa la realización de ensayos mediante la sustitución con materiales ligeros. En la Fig 5.k.4 se presenta una planta de la sección compensada, la que igualmente, cubre un área de 60 x 60 m.

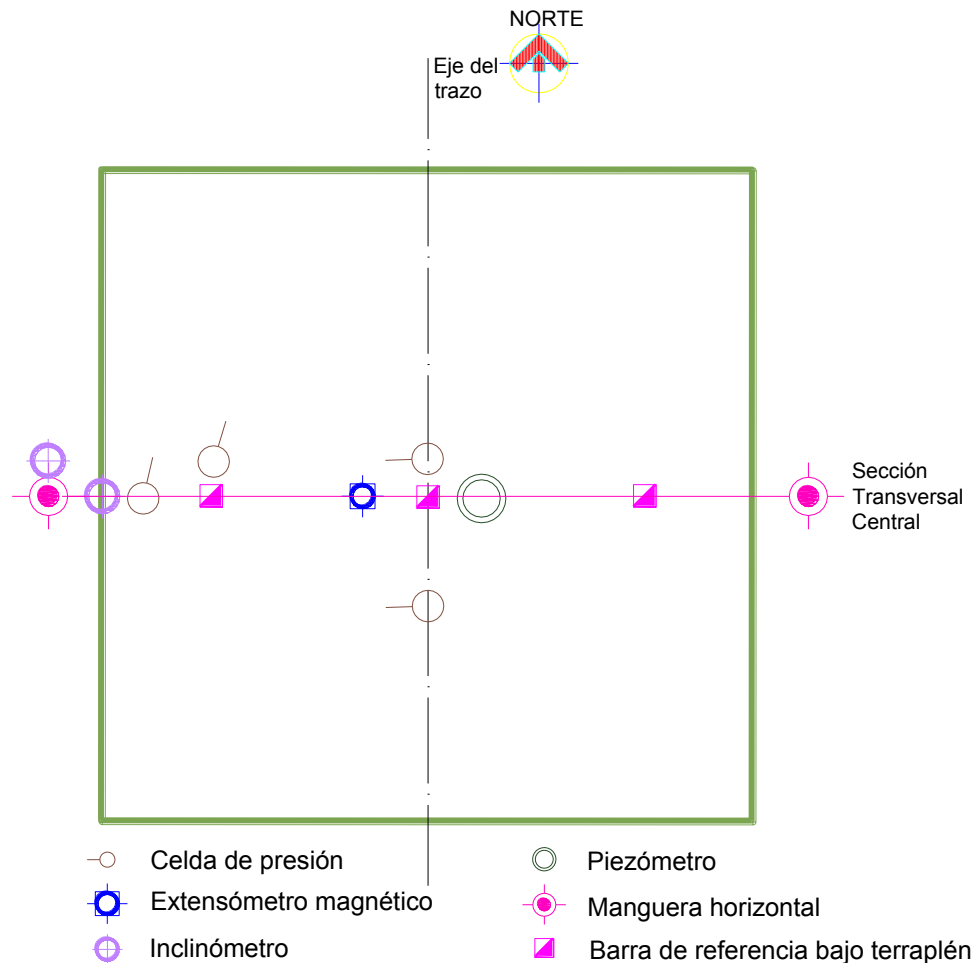


Fig 5.k.4 Esquema en planta de la Instrumentación para la sección compensada

5.k.4.3 Mejoramiento del suelo por precarga

Es posible mejorar las características mecánicas de los suelos finos aumentando su grado de consolidación por precarga lo que tiene los efectos siguientes:



- Acelerar el desarrollo de la consolidación del suelo bajo carga y evitar asentamientos totales o diferenciales importantes a mediano o largo plazo.
- Aumentar la cohesión no drenada del suelo y por tanto la capacidad de carga del terreno.

Para las pistas, rodajes y plataformas del futuro aeropuerto de Texcoco, es previsible que será necesario suavizar el perfil del terreno rellenando algunas depresiones (zonas bajas, canales, drenes) o elevar la rasante en algunos tramos para evitar inundaciones y facilitar el drenaje. El peso de los rellenos y terraplenes requeridos y del pavimento conducirán a asentamientos de magnitud inaceptable y no uniformes. En estos casos, la solución consistente en precargar el terreno es aplicable. Esta técnica de mejoramiento del subsuelo ha sido considerada como la más atractiva por ARUP (2013). En la Fig 5.k.5 se presenta un esquema con estos tramos de prueba. Las dimensiones en planta, a hombros, de cada tramo es de 30 x 30 m.

5.k.4.3.1 Precarga simple

Consiste en colocar sobre el terreno una carga igual a la carga definitiva, eventualmente aumentada de una sobrecarga con lo que se logra lo siguiente:

- Acelerar el desarrollo de los asentamientos de consolidación primaria.
- Acelerar la aparición y el desarrollo de asentamientos de consolidación secundaria.
- Aumentar la cohesión no drenada del suelo.

Resulta más eficiente aplicar precarga con sobrecarga, removiendo la sobrecarga cuando los asentamientos inducidos garantizan el buen comportamiento de la obra futura. El último efecto se logra generalmente mediante una construcción por etapas y resulta útil cuando la resistencia inicial del suelo es insuficiente para soportar la estructura definitiva sin que se presente la falla. Cada etapa conduce a un mejoramiento del suelo que permite la realización de la etapa siguiente.

La precarga tiene el inconveniente de que puede requerir tiempos importantes, especialmente para estratos compresibles potentes. Para acelerar el proceso de consolidación se puede recurrir a la instalación de drenes verticales de arena o prefabricados.

5.k.4.3.2 Precarga con drenes de arena

Los drenes de arena ya han sido empleados para acelerar la consolidación de la arcilla del valle de México bajo terraplenes en el lago de Texcoco y en una planta industrial en Xochimilco. Los suelos tratados con drenes se recubren siempre con una capa

drenante con un espesor de por lo menos 0.5 a 1 m y, en todo caso, superior al asentamiento esperado. Debe preverse el drenaje de esta capa hacia cárcamos de bombeo laterales mediante trincheras drenantes transversales que pueden estar espaciadas de varias decenas de metros. Es conveniente que el material de la capa drenante sea ligero tomando en cuenta que una parte importante del mismo permanecerá en el sitio después de remover la sobrecarga. Una ventaja de los drenes de arena es que contribuyen con su rigidez a uniformar y reducir el asentamiento total del estrato compresible, funcionando en cierta medida como inclusiones semi-rígidas.

5.k.4.3.3 Precarga con drenes prefabricados

La precarga con drenes verticales prefabricados, de cartón o de plástico, es en la actualidad una de las técnicas de mejoramiento del suelo más empleadas en todo el mundo principalmente en arcillas suaves muy compresibles; así lo reseñan múltiples referencias a nivel mundial, varias de las cuales se citan en la Nota Técnica No. GE-2 y su correspondiente Adenda. Se mencionan entre sus ventajas su bajo costo y rapidez de instalación. No obstante, se reconoce que efectos tales como el remoldeo debido a la instalación y la no-saturación de la interfaz con el dren, afectan el comportamiento de estos drenes disminuyendo su eficiencia.

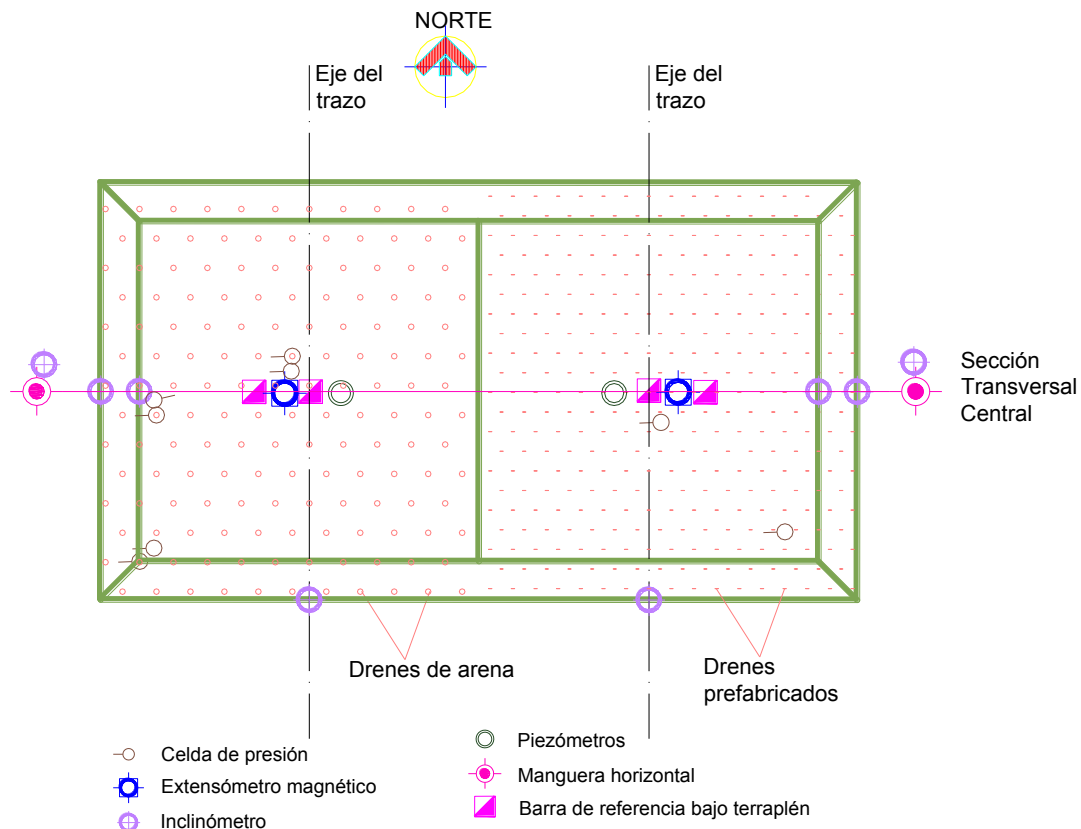


Fig 5.k.5 Esquema en planta de la instrumentación del terraplén con drenes y precarga



5.k.4.4 Mejoramiento del suelo con inclusiones rígidas y terraplén piloteado

Las inclusiones son elementos estructurales de forma cilíndrica que sirven como refuerzo de estratos compresibles ayudando a reducir los asentamientos ocasionados por la consolidación de un medio debida a cargas superficiales y/o por el abatimiento de las presiones intersticiales. Las inclusiones pueden construirse en el suelo recurriendo a diferentes técnicas como el hincado de elementos de concreto prefabricados o de tubos de acero, la inyección a baja presión, el jet grouting y la perforación previa con relleno de materiales granulares (columnas balastadas) o de una mezcla de suelo con un material estabilizante formado de cal y cemento (columnas de cal-cemento).

Para las pistas, rodajes y plataformas del futuro aeropuerto de Texcoco, es previsible que será necesario suavizar el perfil del terreno rellenando algunas depresiones (zonas bajas, canales, drenes) o elevar la rasante en algunos tramos para evitar inundaciones y facilitar el drenaje. El peso de los rellenos y terraplenes requeridos y del pavimento conducirá a asentamientos de magnitud inaceptable y no uniformes. En estos casos, la solución consiste en mejorar el suelo con inclusiones rígidas. Esta técnica tiene la ventaja sobre la precarga de no requerir largos tiempos de espera, y de conciliar y mantener bajos asentamientos en un ambiente donde prevalece el hundimiento regional.

5.k.4.4.1 Inclusiones rígidas coladas en el lugar

El uso de inclusiones rígidas coladas en el lugar para el control de asentamientos es una técnica de cimentación que se utiliza cada vez con mayor frecuencia en la zona lacustre de la Ciudad de México; así se reconoce en la Nota Técnica No. GE-2 y en su Adenda. Se piensa que esta solución es satisfactoria debido al buen comportamiento que han presentado varias estructuras desplantadas sobre este tipo de cimentación. La Fig 5.k.6 muestra el esquema en planta del terraplén (30x30m) por estudiar, incluyendo su instrumentación. Este sistema ha demostrado ser más económico que soluciones tales como el cajón de cimentación o pilotes de fricción, debido principalmente a que:

- las inclusiones no requieren de acero de refuerzo, ya que su diseño se realiza en términos de asentamientos (previa verificación que en términos de capacidad de carga la cimentación sobre losa sin inclusiones es estable),
- la losa de cimentación no requiere de refuerzo para transmitir la carga a los elementos ya que la punta superior de éstos se desplantan a una profundidad suficiente para evitar que las inclusiones transmitan cargas puntuales a ésta,
- el procedimiento constructivo permite obtener altos rendimientos, de hasta 20 inclusiones por jornada.

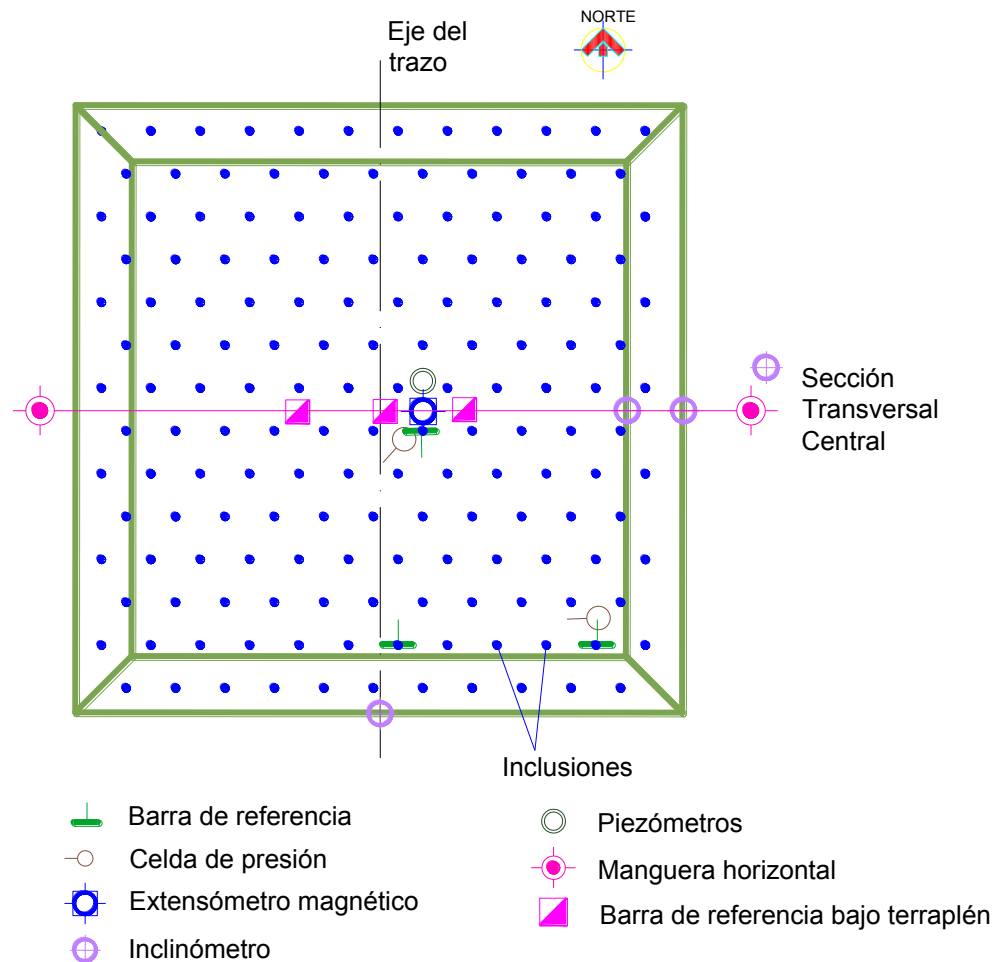


Fig 5.k.6 Esquema en planta de la Instrumentación del terraplén con inclusiones

5.k.4.4.2 Terraplén piloteado

Para los mismos fines, se reconoce en la literatura técnica mundial que cuando se trata de minimizar los asentamientos, se usan como solución pilotes bajo esos terraplenes. Dadas las condiciones que impone el hundimiento regional que prevalece en la zona, dichos pilotes prefabricados deben trabajar fundamentalmente por fricción; esto es, su punta no debe tocar estratos duros, sino que toda su longitud debe estar embebida en la Formación Arcillosa Superior (FAS). Sobre su cabeza, los pilotes cuentan con un capitel con forma de pirámide truncada invertida, que tiene por objetivo propiciar la transferencia de cargas del terraplén a éstos, además de impedir que se desarrolle un posible mecanismo de penetración del pilote en los suelos del terraplén. En la Fig 5.k.7 se muestra un esquema en planta y en elevación del terraplén piloteado por estudiar, incluyendo su instrumentación geotécnica. Sus dimensiones en planta, a hombros, es de 30 x 30 m.

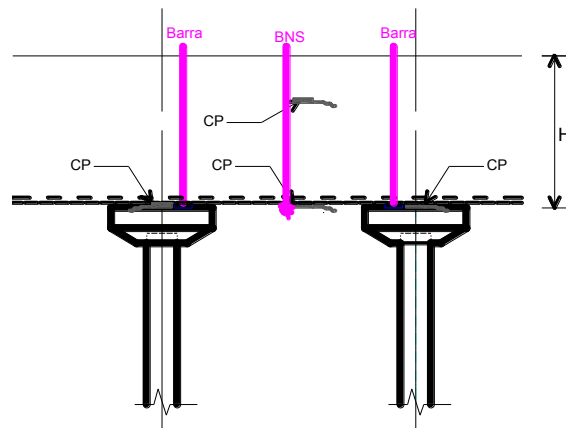
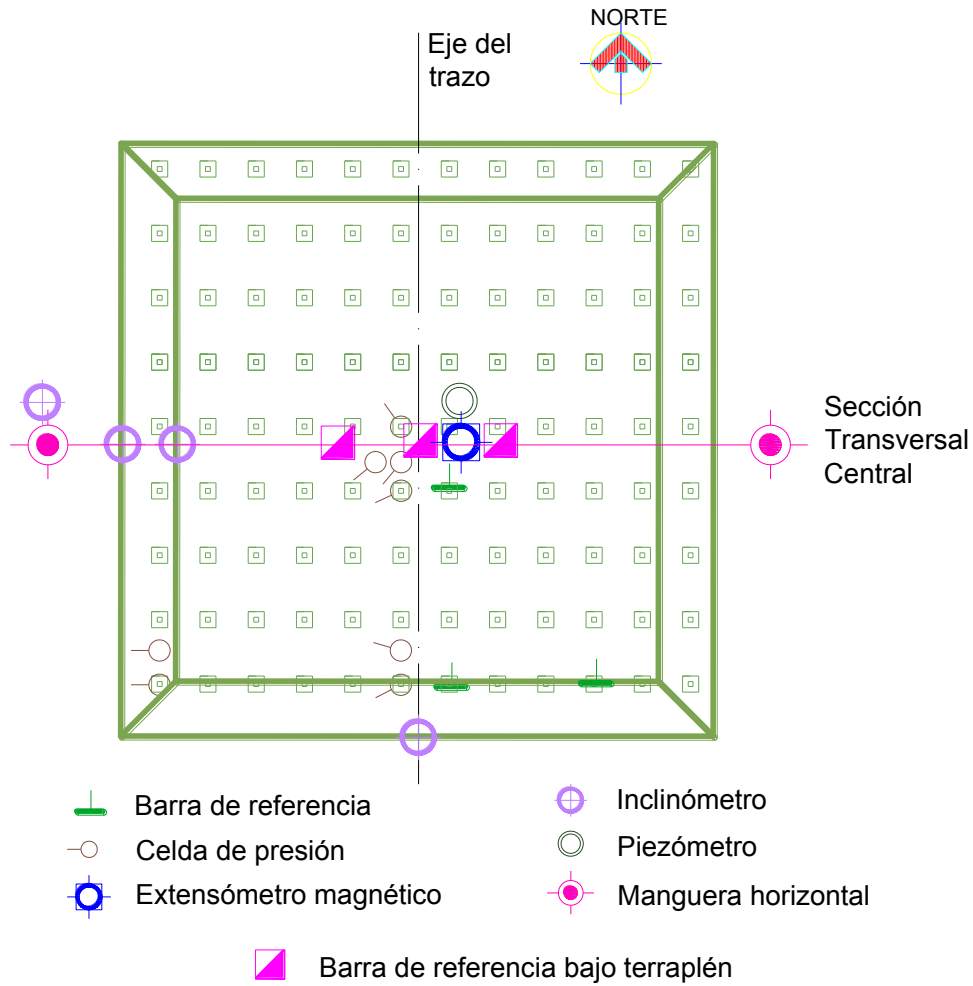


Fig 5.k.7 Esquema en planta y alzado del terraplén piloteado, incluyendo su instrumentación geotécnica



El suelo que queda fuera del área cubierta por los capiteles tiene la tendencia a asentarse generando con ello un fenómeno de arqueo, con lo que se propicia que buena parte del peso propio del terraplén se transfiera al capitel de los pilotes; y de éstos a estratos más profundos, menos compresibles.

La mayor virtud que puede reconocerse a este sistema de cimentación, es el seguimiento muy cercano que se puede lograr entre los movimientos del terraplén, y los que impone el hundimiento regional; en efecto, la flexibilidad del sistema que permite ajustar separación y dimensiones de pilotes, incluyendo su longitud, y las de capiteles, permite lograr mínimo asentamiento de un terraplén, con respecto a la superficie del terreno con hundimiento regional. El uso cotidiano de pilotes de fricción en el Valle de México asegura una solución bien conocida y probada, que puede resultar económicamente rentable, porque si bien los pilotes llevan acero de refuerzo, la separación entre ellos es mayor que las inclusiones rígidas.

5.k.4.5 Celdas estructuradas

El conjunto de celdas estructuradas constituye una opción sólida para cimentar las pistas del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Resultados teóricos muestran que los asentamientos inducidos en las pistas por el peso propio de las celdas más el del pavimento que se desplantará sobre ellas a corto y largo (50 años) plazos, ocurren de manera uniforme, aún en el caso de que en el suelo de apoyo se presenten heterogeneidades a lo largo y ancho de las pistas. Esto es resultado de su alta rigidez a la flexión, característica inherente a las celdas estructuradas, por lo que las condiciones requeridas por el diseño de las pistas se mantendrán inalteradas, asegurando la operación apropiada del aeropuerto por largos períodos.

Para reforzar los resultados teóricos es preciso construir un terraplén de prueba en el que se midan los aspectos significativos del problema físico, como son los asentamientos totales y diferenciales en un área de 30 m x 30 m cubierta por celdas estructurales; en la Fig 5.k.8 se exhibe un esquema en planta de esta potencial solución, incluyendo su instrumentación geotécnica.

Así mismo, con el fin de prospectar el comportamiento de este tramo de prueba (consecuentemente del prototipo) a largo plazo, es necesario recopilar información sobre las presiones de poro y desplazamientos que se generen en el subsuelo. La base de datos que se integre en el transcurso del monitoreo, será de gran valía para estimar el comportamiento de las celdas estructuradas cuando se tengan condiciones del subsuelo apreciablemente diferentes a las encontradas en el sitio de prueba, como es el caso de cruces de las pistas con canales desalinizadores. Además, la construcción del tramo de prueba permitirá afinar detalles en la logística del proceso constructivo de las celdas estructuradas, que seguramente potenciarán la eficiencia e incluso la eficacia de su construcción en grandes extensiones. Un plus de esta solución es la ausencia de los problemas ambientales inherentes a otras soluciones.

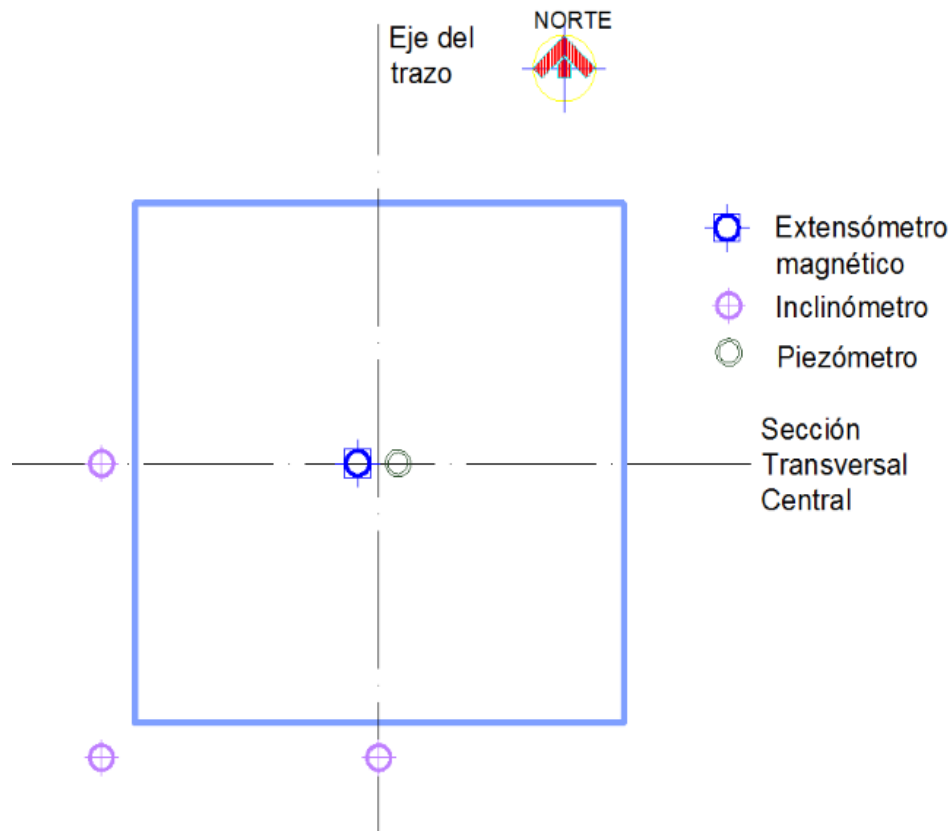


Fig 5.k.8 Esquema del tramo de prueba con celda estructurada y ubicación de su instrumentación geotécnica

La base de datos que se integre, conjuntamente con modelos numéricos que se desarrollen y/o adapten a lo largo de este estudio, servirá también para guiar la toma de decisiones en cuanto al uso de celdas estructuradas para la cimentación de las calles de rodaje, plataformas, edificios de las terminales y torre de control.

5.k.5 Referencias y bibliografía

Aguirre, L M, Zárate, M (1985) “Problematic of geotechnical performance of Mexico City international airport runways, built on ancient Texcoco Lake”, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco, USA.

Alexiew, D y Gartung, E.(1999) “Geogrid reinforced railway embankment on piles–Performance monitoring 1994-1998”, *Proc. of Geosintéticos’99*, Rio de Janeiro, Brazil, 403-411.

Auvinet, G y Rodríguez J (2003) “Diseño de drenes verticales en suelos compresibles estratificados”, *Proceedings of the XIth PCSMGE, ISSMGE*, Cambridge, USA.



Auvinet, G y Rodríguez, J F (2006) “Modelling of rigid inclusions in consolidating soils”, *International Symposium: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions, ISSMGE TC36*, Instituto de Ingeniería, UNAM y SMMS, México, D.F.

Barron R A (1948) “Consolidation of fine-grained soils by drains wells”, *J. Geotechnical Eng. Div.*, ASCE 113, 718-742.

British Standard, BS 8006-1:2010 (2010) Section 8: Design of embankments with reinforced soil foundations on poor ground, London, U. K.

Casagrande, L y Poulos, S (1969) “On the effectiveness of sand drains”, *Canadian Geotechnical Journal*, 6: 287.

Chang, Y C E (1981) Long term consolidation beneath the test fills at Väsby, Sweden, Report No. 13, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden.

Collin, J G, Watson, C H y Han, J (2005) “Column-supported embankment solves time constraint for new road construction”, *CD-Proc. Geo-Frontiers 2005*, ASCE, Austin, TX.

Den Boogert, T, van Duijnen, P y Eekelen, S J M van (2012) Numerical analysis of geosynthetics reinforced piled embankment scale model test, *Plaxis Bulletin*. Issue 31 S

Eekelen, S J M van y Bezuijen, A (2008) “Design of piled embankments, considering the basic starting points of the British Standard BS 8006”, *Proc. of the Euro Geo 4*, Paper Number 315.

Eekelen, S J M van y Venmans, A A M (2010) “Piled embankments in the Netherlands; how to decide, how to design?”, *New Techniques on Soft Soils*, Márcio Almeida, editor, Ed. Oficina de Textos, pp 157-166.

Eekelen, S J M van, Bezuijen A y Alexiew, D (2010) “The Kyoto Road, monitoring a piled embankment, comparing 3½ years of measurements with design calculations”, Paper No. 461, *Proc. of the International Conference on Geosynthetics*, Brazil.

Indraratna, B. y Bamunawita, C (2002) Soft clay stabilization by mandrel driven geosynthetic vertical drains. *Proceedings of the International Workshop: Foundation engineering in difficult soft soil conditions, ISSMGE— Technical Committee TC36*. (May 23-24, 2002). D.F., Mexico. pp. 102-123.

Karunawardena, A y Toki, M (2013) Design and performance of highway embankments constructed over Sri - Lankan peaty soils. *Workshop TC 214 - Foundations Engineering for Difficult Soft Soils Conditions, Proceedings of the 18th ICSMGE*, September 2-6, 2013 Paris, France, pp. 2949-2952.



Kirsten, J F y Wittorf, N (2013) Improvement of a soft clay using rigid inclusions and vertical drains. Workshop TC 211 - Ground Improvement, *Proceedings of the 18th ICSMGE*, September 2-6, 2013 Paris, France, pp. 2513-2516.

Marsal, R J y Ramírez de Arellano, L (1967) “Performance of El Infiernillo dam, 1963-1966”, *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol 93, No. SM4, 265-298.

Martínez, S A y Romo, M P (2013) “Capacidad de carga tridimensional de celdas estructuradas apoyadas en suelo cohesivo: método de análisis simplificado”, *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*, Facultad de Ingeniería, UNAM. Vol XIV, Número 3, julio-septiembre.

Mayoral, J M, Romo, M P, Osorio, L, Cardona, L C, Vázquez, R E, Morales, R, López, L, Martínez, S, Flores, O y Mendoza, M J (2006) “Diseño de la cimentación de la subestación eléctrica Lago I”, Informe Técnico elaborado para Luz y Fuerza del Centro, noviembre, 2006, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Mayoral, J M, Romo, M P y Martínez S (2008) “Advanced 3-D modeling of a Cellular-Raft Foundation in Soft Clay”, *ASCE Conference*, Sacramento, California, USA, May, 2008 (doi 10.1061/40975(318)131).

Mendoza, M J, Romo, M P, Orozco, M, Domínguez, L, Velasco, J M, y Noriega, I (1997) “Primera experiencia de instrumentación sismogeotécnica en una cimentación de cajón y pilotes de fricción en México”, *Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Vol. I, SMIS, Veracruz, Ver., 75-84.

Mendoza, M J (2010) “Sobre la conveniencia de crear un campo de pruebas geotécnicas en un sitio del ex Lago de Texcoco”, *Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Acapulco, Gro.

Pemex (1974). “Diseño y Control de procedimientos de consolidación acelerada de suelos blandos”, Norma elaborada por el II-UNAM (G. Auvinet)

Romo, M P, Martínez, S, Flores, O y García S (2010) “Diseño geotécnico de la cimentación tipo celda estructurada del apoyo cl-34 del tramo elevado de la línea 12 del metro”, Informe Técnico elaborado para Prefabricados y Transportes S.A de C.V, mayo de 2010. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Romo, M P, Ossa, A y Flores, O (2012) “Terraplén aligerado usando mezclas de suelo con perlas de poliestireno expandido, EPS”, Informe Técnico elaborado para Aeropuertos y Servicios Auxiliares, octubre, 2012. Instituto de Ingeniería, UNAM.

PLAXIS 2D (2011) Reference Manual versión 2.

Zárate, M (2013) Comunicación Personal.