



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Experiencia y aprendizajes
geotécnicos en el Lago de
Texcoco**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Jesús Guillermo León Soriano

DIRECTOR DE TESIS

M. I. Gabriel Moreno Pecero



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi maestro Gabriel

A mis abuelitos Mary y Memo

A mis tíos Barney, Telvi y Juan

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a su Facultad de Ingeniería, mi Facultad, por todos los recursos y oportunidades ofrecidas.

A mi maestro, tutor, cómplice, amigo, Gabriel Moreno Pecero. Me quedo con la confianza brindada, las risas, consejos. Si esto es posible en gran parte es porque siempre tuvo palabras para levantarme las veces que me caí. Hasta donde esté y por siempre gracias.

A los Maestros Agustín, Margarita, Sergio, Marcos y Rodrigo por aceptar integrar el grupo de sinodales y por haber sido parte de mi formación académica y humana.

A todos los profesores que formaron parte de mi vida universitaria.

Al ingeniero Edgar Jesús Galindo García, porque sin sus opiniones y su apoyo técnico y moral no hubiera sido fácil alcanzar este objetivo, espero poder corresponder a todo lo manifestado. Gracias especialmente por tu amistad.

A mi mamá por su apoyo incondicional, por mantener la fe, por aguantarme en este camino que volví sinuoso tantas veces. Te amo. Gracias Luis por acompañarla y por lo que hayas tenido que tolerar.

Abuelito Memo, por las charlas, por siempre creer en mí, por ayudarme a reconocer mi integridad y el valor para dejar Oaxaca, algún día volveremos a chancear.

A mis tíos Tevi y Barney por abrirme un espacio lleno de confianza y amor en su familia, los guardo por siempre. A mis primos David y Tevi, por ser parte de ese pilar.

Gracias a Dios, porque en todo momento me fortalezco en él, especialmente en aquellos en los que aparece cualquier tipo de duda.

ÍNDICE

Título	Pág.
Introducción	1
1. Resumen	3
2. Antecedentes	4
3. Camino Directo Peñón – Texcoco (primera alternativa). Estudios para proyecto a cargo de la Secretaría de Obras Públicas (SOP), hoy Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT).	6
3.1 Planteamiento del problema	6
3.2 Elementos disponibles para la solución del problema	9
3.3 Estudios geotécnicos	12
3.3.1 Exploración de campo	12
3.3.2 Pruebas de laboratorio	14
3.3.3 Zonificación	15
3.3.4 Perfiles típicos de los sondeos	18
3.3.5 Características de deformabilidad y resistencia	18
3.4 Análisis de estabilidad	19
3.5 Análisis de hundimientos	26
3.5.1 Descripción	26
3.5.2 Evolución de hundimientos con el tiempo	27
3.5.3 Estudios de drenes de arena	28
3.6 Tramos de prueba	31
3.6.1 Su necesidad	31
3.6.2 Características de los tramos	32

Título	Pág.
3.6.3 Instrumentos de medición	35
4. Primeros resultados	58
5. Conclusiones	61
A. Anexos	64
B. Referencias	81

Introducción

Considero importante preservar la información y/o los documentos que proporcionen datos sobre experiencias y conocimientos obtenidos en diferentes ámbitos de estudio. El caso referido en este escrito es sobre lo acontecido en el desarrollo de la ingeniería civil, particularmente en situaciones que se tuvieron que atender enmarcadas por la experiencia y conocimientos en Mecánica de Suelos. En este documento se pretende integrar la información documental y vivencial surgidas de la investigación geotécnica que se desarrolló durante 16 años en la segunda mitad del siglo XX, de 1965 a 1981, en el ahora Ex - Lago de Texcoco, para con ello brindar la oportunidad de generar una comparativa histórica, fuera del alcance de este escrito, del comportamiento del suelo de dicha zona. Más allá de obviarlo, es importante hacer énfasis en que los resultados de la investigación original se obtuvieron tomando en cuenta las condiciones del suelo del ahora Ex - Lago en esa época.

Es deseable que el contenido de este trabajo sirva como herramienta para atacar los problemas que pueden surgir al tratar con suelos de condiciones similares además de ser, en general, ejemplo del cómo se puede hacer frente a las situaciones que se presentan en el ejercicio de la ingeniería civil, en la que y parafraseando al Dr. Nabor Carrillo, “cada nuevo caso es un problema de investigación, es un reto intelectual sistémico, es un ejercicio de la imaginación y de la inteligencia, de la prudencia y del sentido de observación”.

Se consideran la planeación, el proyecto y el diseño de la Autopista Peñón- Texcoco en su primera alternativa, cuyo propósito fue entre otros, el contribuir al desarrollo de la zona del Municipio de Texcoco, para lo que se consideró conveniente el comunicarla con una vía terrestre rápida, la cual se ubicaría en cerca de 22 km de su longitud total en el ahora Ex-Lago de Texcoco. Se hace referencia a la forma en que se aprendió más sobre el comportamiento mecánico del suelo común en esa área, lo que a grandes rasgos se logró a través de la ejecución de 2 terraplenes de prueba que permitieron conocer principalmente las deformaciones de su terreno de apoyo y,

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

en uno de ellos, el generar lo requerido para producir la falla en dicho terreno de apoyo. Con esta labor también se da a conocer con relativo detalle lo acontecido y aprendido por la observación de la instrumentación implementada.

Es evidente que con el paso del tiempo se pueden desarrollar y mejorar las teorías, y en consecuencia, la tecnología o instrumentos empleados para resolver los problemas propios de cada caso que atañe a la ingeniería civil, pero como lo demuestra lo acontecido durante esta investigación, es indispensable que dichas herramientas sean usadas de forma adecuada. Lo vivido en el ex lago durante los trabajos de la investigación para el camino Peñón – Texcoco constata, sin duda, un ejemplo de cómo conviene proceder a fin de lograr que la ingeniería, en este caso geotécnica, avance positivamente.

“La naturaleza del subsuelo en nuestra capital ha sido causa de dolores de cabeza de los ingenieros y constructores de todos los tiempos. Desde los aztecas hubo fracasos debido a la baja resistencia del subsuelo mexicano; y los españoles tuvieron grandes dificultades para construir los monumentos coloniales que nos legaron.” (Dr. Nabor Carrillo)

Sirva entonces, el preservar esta información para enriquecer el conocimiento generado sobre el empleo de la mecánica de suelos mexicana, cómo se desarrolló y qué elementos fueron necesarios para la toma de decisiones.

1. Resumen

Se hace mención de una serie de experiencias tenidas desde un enfoque geotécnico en el suelo del Lago de Texcoco, el escrito se encauza a dar a conocer los resultados de la investigación de campo realizada con ayuda de instrumentación durante 16 años (1965-1981) en dos terraplenes de prueba y en su terreno de apoyo, localizados en la zona próxima a aquella en dónde se habría construido el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM); dichas experiencias se generaron por decisión de la Secretaría de Obras Públicas (SOP), hoy Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT).



Imagen 1. Fotografía área de los terraplenes de prueba ejecutados.

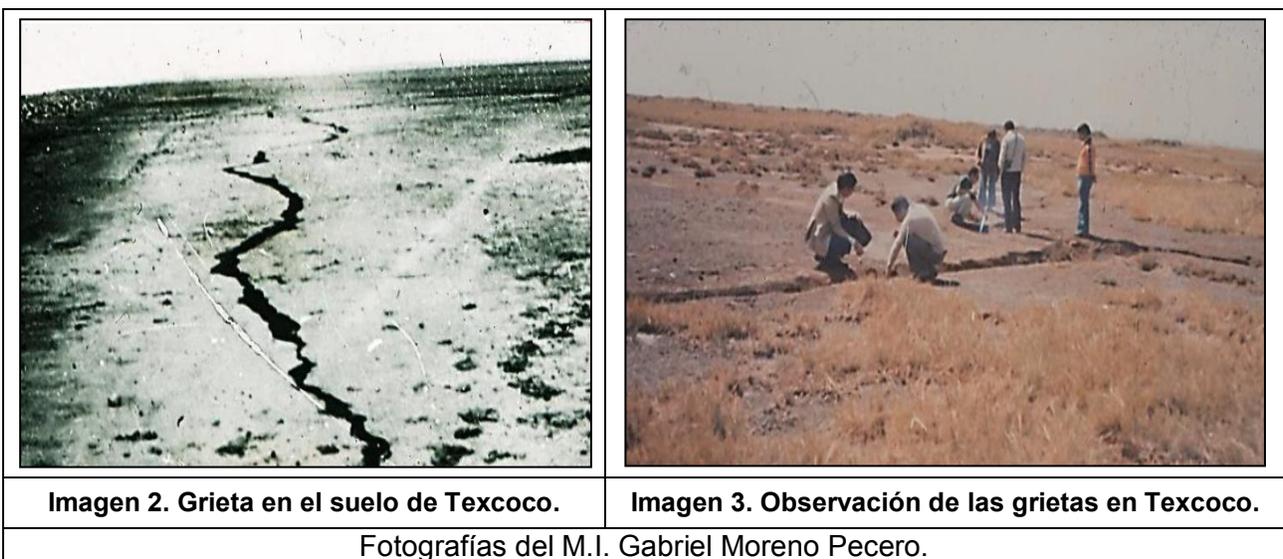
Fotografía proporcionada por M.I. Gabriel Moreno Pecero.

En el proceso de las actividades mencionadas se conocieron características especiales del suelo de apoyo, conocimiento que repercutió en la generación de innovaciones tanto en el diseño como en la construcción de las obras de infraestructura, que sin duda responderían al reto de la ingeniería mexicana de generar un desarrollo tecnológico a nivel mundial.

2. Antecedentes

Al equipo encargado de realizar esta investigación se le planteó el reto de:

- Proyectar una serie de obras de infraestructura en el Lago de Texcoco, en un suelo constituido por arcilla volcánica de las más deformables y de las menos resistentes a nivel mundial, con espesores de cientos de metros. Reto al que se sumaba la existencia de grietas cuya generación en ciertas zonas del Lago se producía bruscamente al caer las primeras lluvias de cada temporada.



Además se les solicitó:

- Reducir la oscilación en la torre de control de la actual Terminal 1 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, la cual se suscitaba al levantar el vuelo los aviones de pasajeros sumamente grandes.

En el inicio del siglo pasado (S. XX) el conocimiento de la Mecánica del Suelo del Lago de Texcoco era escaso porque prácticamente en él no se tenían obras de infraestructura, lo que sí ocurrió en el transcurrir de la segunda mitad del siglo cuando se tuvo la presencia de obras que encauzaron y despertaron el interés de la ingeniería mexicana, dentro de las cuales destacaron la ubicación, planeación, proyecto y construcción del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, así como las correspondientes al llamado Proyecto Texcoco que propuso en su tiempo el

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Dr. Nabor Carrillo, y cuyo impacto en el bienestar de la población de la Ciudad de México fue un ejemplo viviente de la actitud que debe darse en la ingeniería, particularmente en la civil mexicana.

	
Imagen 4. Trabajos para reducir oscilación en torre de control.	Imagen 5. Torre de control del aeropuerto.
Fotografías del M.I. Gabriel Moreno Pecero.	

Con las investigaciones efectuadas en el Proyecto Camino Directo Peñón – Texcoco, se tuvo el conocimiento suficiente para enfrentar satisfactoriamente los retos que se presentaron. En el proceso de las actividades mencionadas se conocieron ciertas características especiales del suelo de apoyo, lo que repercutió en la generación de innovaciones tanto en el diseño como en la construcción de las obras de infraestructura y sin duda, con ello se respondió al desafío de la ingeniería mexicana de generar un desarrollo tecnológico a nivel mundial.

Como complemento de estos breves pero necesarios antecedentes, se consideró adecuado mencionar que los suelos se pueden clasificar en cuanto a sus características como críticos o no críticos; los primeros se particularizan por poseer propiedades mecánicas especiales, tales como una gran deformabilidad y muy poca resistencia al esfuerzo cortante. En el mundo los suelos que ubicamos como críticos se tienen en varias regiones, pero entre ellos se destaca el que existe en el Ex-Lago de Texcoco.

3. Camino Directo Peñón – Texcoco (primera alternativa). Estudios para proyecto a cargo de la Secretaría de Obras Públicas (SOP), hoy Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT).

3.1 Planteamiento del problema

La construcción de carreteras a través de zonas constituidas por depósitos de suelos deformables y poco resistentes ha sido tradicional y particularmente un problema difícil en la ingeniería de carreteras y, desde luego, siempre costoso en su resolución. A la vez es una situación imposible de ignorar, pues un mal proyecto produce necesariamente una estructura peligrosa para el usuario, de mantenimiento costoso y/o en añadidura de vida muy breve. Por estas razones se comprende que el ingeniero trate de evitar con cambios de localización el paso de una carretera a través de zonas desfavorables; este criterio explicó la relativa escasez de experiencias y trabajos sobre estos temas que se notó en la literatura especializada de todo el mundo. Sin embargo, puede haber ocasiones en que el evitar las zonas inestables produzca trazos demasiado largos, indirectos y/o más costosos, no quedando más alternativa que lanzar la carretera a través del área indeseable.

Para proyectar terraplenes en suelos deformables y poco resistentes hay dos preguntas básicas para las que es preciso tener respuesta:

- a.- ¿Soportará el suelo de cimentación la carga impuesta por el terraplén sin excesivo desplazamiento o falla por esfuerzo cortante?
- b.- ¿Ocurrirán en el suelo de cimentación asentamientos excesivos debidos a su consolidación?

Afortunadamente en la actualidad se reconoce que una aplicación razonable de las teorías y experiencias de la Mecánica de Suelos permite acercarse a la respuesta de esas preguntas en forma lo suficientemente aproximada, cuando menos como para poder sentar las bases de un criterio sano. Sin embargo, dos cuestiones básicas deben preocupar al ingeniero que se enfrenta a un proyecto de estas características. La primera es que las soluciones teóricas a los problemas de mecánica de suelos pueden resultar incompletas, tanto por lo que se refiere a sus fundamentos filosóficos

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

como a sus alcances prácticos; la segunda es que las experiencias de las que se dispone en la Mecánica de Suelos son de extrapolación muy peligrosa. En el caso de la investigación realizada a partir de mediados de los años sesenta del siglo XX, se vio que había muy pocas construcciones sobre áreas inestables importantes, por ello se comprende que la experiencia verdaderamente confiable en ese terreno se haya considerado escasa.

La garantía que se podía tener de dar una buena respuesta a las dos preguntas planteadas dependía también en forma importante de la abundancia de la exploración que se efectuara, del cuidado que se pusiera en sus técnicas y de que éstas fueran las apropiadas, de la calidad de las muestras inalteradas que se consiguieran, de la correcta programación y ejecución de las pruebas de laboratorio y finalmente, de la adecuada interpretación de los datos arrojados por dichas pruebas.

Para cruzar un área importante de subsuelo deformable y poco resistente con una carretera, se habían utilizado en diversos lugares distintos métodos, dentro de los cuáles los más comunes fueron los que se indican a continuación:

1.- Desplazamiento total del material indeseable bajo la carretera y su sustitución por un material más conveniente, bien fuera utilizando para ello el peso propio del terraplén o realizando una excavación “ad hoc”. Esta era sin duda, una solución de carácter definitivo cuando podía aplicarse; sin embargo en el caso del cruce por el Lago de Texcoco estaba totalmente descartada dado el gran espesor de los estratos deformables.

2.- Solución del problema mediante un viaducto. Esta solución posiblemente podría haberse logrado que fuera definitiva en cualquier circunstancia, pero a un costo que por lo menos en el caso del Ex - Lago de Texcoco se consideró exorbitante, ya que en términos generales para este tipo de estructura los costos resultaban aún mayores en la Ciudad de México, por lo que no resultó una solución rentable para el camino Peñón – Texcoco.

3.- Construyendo una sección estable sobre el subsuelo deformable y débil, y que ésta sufriera los asentamientos inevitables. El que esta solución fuera o no

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

conveniente dependía de la cantidad de material que era necesario colocar para lograr la sección estable. En el caso de que fuera adoptada esta solución, cobrarían una gran relevancia todos los análisis relacionados con capacidad de carga del terreno y estabilidad de los terraplenes, así como los de asentamientos de la sección propuesta; es sabido que un mismo volumen de tierra puede disponerse de muy diversas formas y conveniencias. Así, el cómo el proyectista jugara con sus volúmenes de tierra, con las diversas geometrías, con elementos auxiliares tales como bermas, materiales ligeros, etc., pasaba a tener una importancia decisiva. También la velocidad y los procedimientos de construcción adquirirían un papel trascendente. Por lo tanto, esta solución podía ser de mucho éxito si se conseguía una sección comparativamente económica y de un comportamiento relativamente bueno o podía ser un completo fracaso si la sección que el proyectista elegía en el papel no justificaba esa decisión sobre el terreno. En caso de éxito esta solución era la más económica, los proyectistas de la SOP la eligieron para resolver su problema procediendo con justificado optimismo, dado que la construcción de terraplenes sobre zonas inestables no era nueva en México y este tipo de problemas se había resuelto siempre a muy buenos costos y de formas razonablemente satisfactorias.

4.- El cuarto método podía considerarse una variante del tercero, pero por sus características técnicas “sui géneris” y por sus costo mereció destacarse en forma especial; este cuarto método era el de la estabilización de los terraplenes y del subsuelo de cimentación por medio de drenes verticales de arena; esta solución fue objeto de un estudio minucioso por parte de los proyectistas.

Desde un principio se consideró importante lograr que la sección inicial construida con el método señalado en el punto 3 tuviese la máxima altura compatible con la estabilidad, con el fin de que el mayor monto posible del asentamiento ocurriera sin necesidad de recargues de consideración, tratando inclusive de lograr una sección tal que quedase con la altura mínima necesaria una vez que hubiese sufrido la totalidad del asentamiento. De esta manera se lograría obstaculizar al mínimo la operación de la carretera una vez inaugurada y se podría proceder a su pavimentación definitiva

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

desde un principio. Para profetizar acerca de estas cuestiones fue fundamental analizar los tiempos en que ocurrirían los asentamientos previstos; ya que al reflexionar en esa dirección, surgió el problema de que la evolución del asentamiento con el tiempo era un punto de los que menos podían garantizarse con el uso de las teorías vigentes en su momento.

3.2 Elementos disponibles para la solución del problema

Como ya se indicó, el problema planteado por el proyecto del camino directo México – Texcoco tuvo dos puntos fundamentales: el análisis de la estabilidad y el análisis del asentamiento.

El análisis de estabilidad de un terraplén sobre un terreno inestable se consideró que debía incluir tres computaciones diferentes:

- 1.- Estudio de la posibilidad de falla del terreno de cimentación por capacidad de carga.
- 2.- Estudio de la posibilidad de falla del conjunto terraplén – terreno de cimentación siguiendo una superficie de falla circular (Método Sueco). Este cálculo involucraba aspectos en los que influía el tiempo, por lo que debía realizarse a corto y a largo plazo.
- 3.- Estudio de la posibilidad de falla lateral siguiendo el método de Terzaghi o de la cuña.

Los tres cálculos se realizaron para los terraplenes del camino Peñón – Texcoco y en lo que sigue se glosan algunas de las ideas que se tuvieron en cuenta para la realización de los mismos.

En primer lugar se consideraron dignas de análisis las conclusiones a las que llegó sobre los valores de resistencia el Dr. A. Casagrande, después de estudiar a fondo el problema de la construcción de un terraplén sobre un terreno inestable, hasta cierto punto similar al que se analizaba. Casagrande realizó pruebas triaxiales a contenido de agua constante y con diferentes tiempos de aplicación de carga, llegando a la importante conclusión corroborada por otros investigadores, de que en pruebas con aplicación lenta de la carga la resistencia al esfuerzo cortante podía ser bastante

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

menor que lo que revelaban las pruebas usuales, tales como la de compresión simple o la prueba triaxial rápida no drenada. Casagrande midió con frecuencia disminuciones de la resistencia de hasta un 30%. Después de estudiar la sensibilidad de las arcillas del Lago de Texcoco que se encontró relativamente alta, y teniendo en cuenta las importantes concentraciones locales de esfuerzo y por ende de deformación que un terraplén inducía al subsuelo, se decidió efectuar todos los análisis de estabilidad en los terraplenes bajo estudio, adoptando el criterio señalado por el Dr. Casagrande pero elevando ligeramente el valor de la resistencia de proyecto respecto a los valores por él recomendados, para lo que se tuvieron en cuenta tanto las características especiales de la arcilla del Lago de Texcoco como los resultados y experiencias de otros investigadores sin práctica en dicho lago, por eso se consideró como una limitante del estudio el hecho de que las pruebas realizadas predominantemente fueran a corto plazo, ya que las pruebas a largo plazo resultaban más propicias.

En lo relativo a los análisis de estabilidad a largo plazo, la resistencia al esfuerzo cortante que se consideró provino de pruebas rápidas consolidadas realizadas sobre especímenes inalterados de arcilla; se cuidó también que dichos valores se mantuvieran congruentes.

El análisis de capacidad de carga se realizó de forma más simple aplicando el criterio de Prandtl modificado, pues en lugar de utilizar $(\pi + 2)c$ como capacidad límite, se utilizó el valor $4c$. La razón para esto fue que las arcillas del Lago de Texcoco eran materiales de falla frágil para una amplia gama de circunstancias, por lo que se creyó que difícilmente se podían satisfacer las hipótesis de plasticidad perfecta supuestas por Prandtl; el valor $4c$ estaba avalado por la Escuela Brasileña con numerosas pruebas sobre distintos modelos.

El análisis de estabilidad a lo largo de una superficie circular de falla se hizo siguiendo el Método Sueco tradicional, utilizando el procedimiento propuesto por A. Casagrande para terraplenes colocados sobre suelos cohesivos. No se ensayaron otras superficies diferentes de la circular porque se juzgó, que en este tipo de

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

materiales esas otras superficies únicamente complicaban los cálculos y no añadían mayor precisión. El procedimiento de cálculo podía aplicarse inclusive tomando en cuenta la formación de una grieta en el cuerpo del terraplén, que reducía o eliminaba la contribución de esta parte a la resistencia del conjunto. Esta precaución de cálculo fue probablemente demasiado conservadora en el caso de Texcoco dado los materiales que se pensaba usar, sin embargo se decidió adoptarla.

El método de análisis de cuña se realizó siguiendo los procedimientos tradicionales debidos a Terzaghi y la variante propuesta por Sherard y coautores.

Para el cálculo de los asentamientos el arma fundamental de la que se disponía era la teoría de consolidación unidimensional con flujo vertical de Terzaghi; fue la que se aplicó en el caso del camino Peñón-Texcoco.

La Teoría de Terzaghi tenía como una de sus hipótesis básicas el que la deformación ocurría sólo en la dirección vertical; en este caso la fuerte fluencia lateral que se presentaba bajo el camino hacía que la teoría fuera de aplicación dudosa, por lo que se abrió un campo de investigación que debía acometerse para tener un mejor conocimiento del comportamiento mecánico del suelo. La teoría permitiría calcular los asentamientos cuando menos con la precisión suficiente para normar criterio, aunque los resultados fueron algo mayores que los que ocurrirían en realidad.

Un caso diferente se tuvo respecto a la evaluación de los asentamientos con el tiempo, los cuales podían calcularse también con base en la teoría de Terzaghi, pero entonces de forma mucho menos confiable por dos razones principales. La primera, por el flujo lateral de agua que ocurriría bajo el terraplén y que no estaba considerado en la teoría; la segunda, por frecuentísimas intercalaciones de lentes de arena imposibles de definir y que proporcionaban un drenaje mucho más libre del que la teoría permitía tomar en cuenta; como consecuencia los tiempos de asentamientos teóricos en cuanto a su rapidez no eran congruentes con los medidos, es decir los asentamientos teóricos eran menos rápidos que los reales.

Para tratar de producir los asentamientos en el menor tiempo posible, logrando que ocurrieran durante el tiempo de construcción en su parte substancial, se podía

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

recurrir a la utilización de drenes verticales de arena que aumentaran el drenaje del suelo y disminuyeran así el tiempo de consolidación. El cálculo de estos elementos así como la reducción de los tiempos en que ocurriría la consolidación podía realizarse utilizando las teorías elaboradas por el Dr. Nabor Carrillo o bien la teoría generada por el Dr. Eulalio Juárez Badillo.

Hubo muchas discusiones entre los especialistas sobre el comportamiento y la eficiencia de los drenes verticales de arena, para definir este punto se analizaron referencias fundamentales de las que se disponía en ese momento. Se vio así que los resultados obtenidos en diferentes partes del mundo distaban de ser concordantes y que, más bien, eran fuertemente contradictorios, lo que estuvo de acuerdo hasta cierto punto con el sentir de los proyectistas de la SOP.

3.3 Estudios geotécnicos

3.3.1. Exploración de campo

Si se consideran exclusivamente aquellos sondeos que se realizaron a lo largo del eje de la obra que se planteaba, en el camino directo Peñón-Texcoco se llevó a cabo la siguiente exploración:

1.-SONDEOS INALTERADOS PRÁCTICAMENTE CONTINUOS O CONTINUOS

Tabla 1. Sondeos inalterados		
SONDEO	CADENAMIENTO	PROFUNDIDAD (m)
I	1+063 (Anexo 2)	40.0
II	1+664	57.0
III	2+864	60.0
IV	2+864	40.0
V	4+063 (Anexo 3)	60.0
V'	5+263	30.0
VI	4+063	15.0
VII	5+263	15.0
VIII	6+763	60.0
VIII-A	6+763 (Anexo 4)	30.0
IX	8+263 (Anexo 5)	60.0
X	9+763	50.0
XI	11+263	15.0
XII	13+263	12.0
XIII	2+015	20.0

SONDEO	CADENAMIENTO	PROFUNDIDAD (m)
XIV	2+035	20.0
XV	17+523	15.0
XVI	17+563	20.0
XVII	9+000	30.0
XVIII	14+500	30.0
XIX	12+500	30.0
XX	16+500	30.0

2.- SONDEOS EXPLORATORIOS A FIN DE DEFINIR LA INCRUSTACIÓN DEL BORDO EXISTENTE EN LA MÉXICO-TEXCOCO

La incrustación se refirió al hundimiento generado durante y en el tiempo inmediato a la terminación de su construcción. Para los fines señalados se realizaron 15 sondeos con posteadora, casi uniformemente distribuidos entre las estaciones 2+000 y 19+000, con una profundidad de sondeos del orden de 4.0 m.

3.- DIVERSOS SONDEOS EXPLORATORIOS

A los lados y a lo largo del bordo existente de México a Texcoco, con el fin de definir tanto la sección transversal del bordo como las ubicaciones convenientes de los sondeos inalterados profundos, se realizaron 7 sondeos exploratorios con posteadora y barrenos helicoidales. La profundidad media de estos sondeos fue de 4.0 a 5.0 metros.

Respecto a los sondeos exploratorios realizados con posteadora no se consideró necesaria ninguna explicación adicional. Los sondeos inalterados fueron de 10 cm de diámetro con tubo Shelby de pared delgada y, en muchos casos, con muestreadores de pistón para evitar la pérdida de las muestras por falta de adherencia entre el suelo y la pared del muestreador.

En algunos puntos específicos se realizaron pruebas dinámicas de penetración estándar. También se efectuaron pruebas de veleta en puntos característicos, no excediéndose profundidades del orden de 20 metros.

Además de la información que se ha descrito antes, obtenida específicamente para el camino directo Peñón- Texcoco, los proyectistas de la SOP dispusieron de toda la

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

información que se obtuvo a su vez para la realización del proyecto del F.C. México-Acapulco, el cual cruzaba el Lago de Texcoco en una zona cercana al camino directo México-Texcoco. Asimismo se dispuso de la información generada por la Comisión Federal de Electricidad para el proyecto y la construcción de una línea de torres de alta tensión a través de la zona del Lago.

3.3.2.- Pruebas de laboratorio

A las muestras inalteradas obtenidas de los diferentes sondeos se les efectuaron los siguientes ensayos:

1. Clasificación visual y al tacto (**SUCS**).
2. Límites de consistencia (Límite Líquido (w_{LL}) y Límite Plástico (w_{LP})).
3. Humedad natural (w).
4. Peso volumétrico (γ_m).
5. Grado de saturación (S_v).
6. Resistencia a la compresión simple (q).
7. Prueba de compresión triaxial rápida y consolidada rápida. (Esta última prueba no se realizó en todos los especímenes) (**Anexo 1**).
8. Prueba de consolidación (en la gran mayoría de las muestras).

Además los resultados fueron obtenidos a partir de situar los valores de las diferentes muestras sometidas a las pruebas, en la carta de plasticidad.

A las muestras provenientes de los sondeos exploratorios realizados con posteadora se les determinó el contenido natural de agua y se les hicieron pruebas de clasificación.

Los resultados obtenidos en los diferentes sondeos se correlacionaron con la estratigrafía que se encontró en cada uno de los ellos (**Anexo 2 a Anexo 5**). Del análisis de toda esa información pudieron establecerse las siguientes tres conclusiones que normaron el criterio de los proyectistas (zonificación **(1.)**, perfiles típicos de los sondeos **(2.)** y características de deformabilidad y resistencia **(3.)**).

3.3.3 Zonificación

1. El tramo de la carretera Peñón - Texcoco que se desarrollaba entre los km 0+000 en las cercanías del Peñón, y 20+000 ya cerca de la población de Texcoco, para fines de proyecto podía considerarse dividido en tres zonas bien definidas.

ZONA I.- Del km 0+000 al km 2+000 y del km 15+500 al km 20+000

Esta zona se caracterizaba por depósitos recientes poco deformables en la superficie, con espesores comprendidos entre 5.0 m y 7.0 m. Bajo estos depósitos aparecía un manto arcilloso deformable, pero con abundantes intercalaciones de estratos de arena. Esta zona en ninguna época del año se veía cubierta por el agua, razón por la cual los terraplenes podían proyectarse con las alturas mínimas impuestas por otras consideraciones ajenas a la Mecánica de Suelos.

Así fue cómo en estos lugares concurría una pequeña sobrecarga con unas condiciones del subsuelo que en comparación al resto del Lago de Texcoco se veían más favorables, especialmente por la influencia de los depósitos superficiales poco deformables y más resistentes. Por estas razones se estimó que en estas zonas no existía un problema especial de Mecánica de Suelos y por lo tanto el proyecto de las secciones quedaría fijado por consideraciones normales.

ZONA II.- Del km 2+000 al km 11+000

Correspondía a la zona del Lago que estaba cubierta permanentemente por agua. El máximo tirante del agua era del orden de 1.0 m, según datos proporcionados por la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, con un oleaje esperado del orden de 50 cm de altura máxima. La estratigrafía en esta zona estaba constituida por un importante estrato de arcilla volcánica de alta deformabilidad, baja resistencia y clasificación oscilante entre arcilla de alta plasticidad (CH) y limo de alta plasticidad (MH). El estrato tenía un espesor que excedía en mucho la profundidad máxima explorada. Este potente estrato estaba surcado por frecuentes intercalaciones de lentes delgadas de arena cuya continuidad no podía garantizarse, lo que daba lugar a estimaciones muy dificultosas de evolución de los asentamientos con el tiempo. La

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

arcilla estaba normalmente consolidada con excepción de una capa superficial de espesor muy variable que se encontraba preconsolidada.

Los datos de la resistencia que en promedio se establecieron como base de proyecto fueron:

- Resistencia a la compresión simple: 3.0 t/m²
- Cohesión para análisis de falla rápida, suponiendo a la arcilla un suelo puramente cohesivo: 1.3 t/m², considerando la reducción de resistencia de la que se habló en el capítulo II
- Peso volumétrico del material: 1.2 t/m³

Para análisis de estabilidad a largo plazo con esfuerzos totales:

- $c = 1.1 \text{ t/m}^2$
- $\Phi = 16^\circ$

Para análisis de estabilidad a largo plazo utilizando esfuerzos efectivos:

- $c = 1 \text{ t/m}^2$
- Φ comprendido entre 10° y 20°

Para el cálculo de asentamientos:

- $m_v = 0.025 \text{ m}^2/\text{t}$
- $c_v = 4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Los terraplenes que se construyeran en la zona II debían tener, en principio, una altura mínima de 2 m, uno cubierto por el agua y otro sobre dicho nivel como altura mínima rasante. Además, era de prever que una parte del material que se colocara se incrustaría de inmediato en la parte lodosa del lago; no era posible precisar a priori el espesor incrustado. Tanto en esta capa de incrustación como en la plantilla que se colocaría hasta que el terraplén sobresaliera del agua, se tenía la necesidad de contar con un material estable en la misma y que no se perdiera en el lodo del fondo del lago; estas características correspondían a las de una arena bastante limpia o una mezcla de arena y grava de graduación conveniente; por esta razón se pensó desde el principio que la plantilla de construcción más la capa de incrustación se construyeran de un material granular fuera cual fuera el cuerpo del terraplén

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

propriadamente dicho. Así pues, para tener dos metros de altura sobre el nivel original del terreno sería necesario darle desde el inicio los dos metros más el espesor incrustado. Por otra parte, durante el proceso de construcción como en el tiempo subsecuente, la sección sufriría hundimientos por consolidación que harían que la altura final ya no fueran los dos metros sobre el nivel del terreno, se hizo preciso dar desde un principio una altura adicional que tomara en cuenta ese asentamiento; así podría lograrse una sección inicial que después de sufrir su asentamiento total produjera una sección final que representara la mínima requerida por el camino; no cabía duda de que esto estaría muy cerca del diseño ideal. A esta tendencia se oponía la limitada capacidad de carga del terreno; se vio así que el diseño al que había que tender sería una solución de compromiso tratando de conciliar ambos aspectos.

Fue obvio que la altura inicial podía ser más grande cuanto más ligero fuera el material que constituyera al terraplén y esa fue una razón importante a favor del uso de materiales ligeros. Se llegó así a uno de los puntos fundamentales de criterio en el proyecto del camino Peñón- Texcoco a cargo de los proyectistas de la SOP; éste fue el decidir si los terraplenes se habían de construir con materiales ligeros o con materiales pesados. La razón del dilema era que en el Lago de Texcoco los materiales ligeros estaban más lejos que los pesados, por lo cual su empleo era mucho más costoso por ser mayores sus acarrees; por otra parte, el volumen requerido de material ligero era menor que el requerido de material pesado y, finalmente, con los materiales pesados una sección inicial que después de asentarse se conservase con la mínima altura requerida sería demasiado alta para la capacidad de carga del terreno, por lo que tenía que ser hecha en etapas, lo que posiblemente conduciría a tiempos de construcción demasiado largos o a interrupciones de operación en el camino. Analizando cuidadosamente todos los factores, tanto económicos como técnicos, no fue fácil decidir a esas alturas de las consideraciones qué tipo de material debía usarse y, desgraciadamente, fue necesario reconocer que las teorías disponibles no eran lo suficientemente precisas como para dilucidar un

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

punto tan delicado y del que dependían fuertes sumas de dinero. Estas ideas junto a las expuestas en los Capítulos I y II, hicieron pensar cada vez con más fuerza en la construcción de tramos de prueba.

ZONA III.- Del km 11+500 al km 15+500

Aunque esta zona se desarrollaba sobre los mismos depósitos deformables descritos para la Zona II, se distinguía de ella por no tener un tirante de agua permanente y por ser éste cuando se presentaba, de una altura notoriamente inferior, del orden de 30 cm como máximo.

Los terraplenes en esta zona se construirían básicamente con los mismos criterios empleados en la zona II, pero podrían hacerse de menor altura.

3.3.4 Perfiles típicos de los sondeos

2. Como segunda conclusión pudo establecerse el criterio fundamental de que en el Lago de Texcoco no debía permitirse la falla del terreno natural, pues dicha falla, dadas las características del subsuelo traería consigo una fortísima pérdida de resistencia y sería de recuperación muy lenta, volviéndose muy problemática la construcción sobre la zona fallada. Por esta razón la determinación precisa de la capacidad de carga del terreno cobró gran importancia y se tuvo un nuevo argumento para la utilización de los terraplenes de prueba a escala natural.

3.3.5 Características de deformabilidad y resistencia

3. El subsuelo en el Lago de Texcoco era especialmente crítico, pero no tan especial como para limitar a la ingeniería mexicana a construir en él. Aunado a ello la Secretaría había construido carreteras de funcionamiento satisfactorio, tales como: el camino directo México-Puebla, en el tramo sobre el Ex - Lago de Chalco, y el camino Coatzacoalcos-Minatitlán, etc. Por estas razones se estimó que el asentamiento, si bien constituía un grave problema que de ningún modo se podía subestimar, planteaba una condición menos crítica que la falla por resistencia al corte de la que se habló. Puede decirse que en conjunto la deformabilidad del suelo y su resistencia nos permiten conocer su comportamiento, ambas características deben ser del mismo interés del ingeniero sobre todo en este tipo de suelos.

3.4 Análisis de estabilidad

Como se indicó anteriormente, las secciones del terraplén del camino estaban supeditadas a consideraciones de Mecánica de Suelos, por lo menos las que se localizaban en las zonas II y III, por lo que los análisis de estabilidad se realizaron considerando las condiciones de resistencia y deformabilidad del subsuelo de esas zonas.

1.- Inicialmente se consideró la estabilidad de una sección con arena pesada que exigía incrustar parte de la misma en el subsuelo, para lo cual se necesitaba ejecutar, previamente a la colocación del terraplén, una canalización cuyo objeto era lograr una especie de compensación a fin de reducir al máximo los hundimientos y además lograr una distribución uniforme de los esfuerzos generados por la acción del terraplén, para lo cual se dio una sección cuya plantilla era de forma abovedada, teniendo una menor profundidad en el centro.

El análisis, así realizado, tuvo como fundamento la experiencia de la construcción del terraplén para el ferrocarril que atravesaba el Lago Salado.

La construcción del canal planteaba problemas en el procedimiento de construcción, además de que la sección estable resultaba sumamente robusta, lo que hacía que el proyecto en esas condiciones fuese muy costoso, por lo que se desechó.

2.- Como alternativa de la sección anterior se estudió otra directamente desplantada sobre la superficie del terreno y estabilizada con bermas. Como una posibilidad, el cuerpo del terraplén propiamente dicho se consideró formado por tezontle con peso volumétrico del orden de 1.3 ton/m^3 , y las bermas con material pesado cuyo peso volumétrico era del orden de 1.7 ton/m^3 .

En esta sección se previó la utilización de una plantilla arenosa cuya función se pensó que sería:

- a.- Repartir las presiones de contacto a manera de uniformizar su distribución y, por lo tanto, reducir al máximo los hundimientos diferenciales.
- b.- Evitar la incrustación en el subsuelo del material que formaba el cuerpo del terraplén.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

c.- Sellar los posibles agrietamientos en la base del terraplén, los cuales podían ser provocados por los hundimientos diferenciales que se presentaran.

Esta solución exigió un volumen de tezontle que prácticamente agotaba el de los bancos en las proximidades del camino, que eran los utilizados en las construcciones urbanas; por lo que se procedió a la localización de un banco con el volumen deseado, además al estudio de un procedimiento de explotación y acarreo que resultasen económicos.

3.- Paralelamente se pensó en la posibilidad de industrializar la explotación del banco de arena limosa del cerro “La Caldera” para la formación de las terracerías, lo que obligó a determinar la sección geométrica con un material pesado ($\gamma = 1.8 \text{ ton/m}^3$), que presentase las siguientes condiciones:

a.- Sección homogénea.

b.- Bermas estabilizadoras.

c.- Materiales arenosos con finos en la base del terraplén.

Esta solución obligaba a la utilización de un procedimiento de construcción por etapas, ya que la baja resistencia y alta deformabilidad del material de cimentación no permitían la construcción de terraplenes con una altura inicial lo suficientemente grande para que con los hundimientos que se produjesen se alcanzara una altura final del orden de 2 m respecto al nivel del terreno natural, lo que daba por resultado un mantenimiento y operación costosos.

4.- Otra alternativa consistió en analizar una sección conformada con arena limosa ligera de origen volcánico para el cuerpo del terraplén, procedente del banco llamado “Tarango”, y una plantilla de un metro de espesor constituida por arena limosa del banco “La Caldera”, cuya función era semejante a la mencionada en el punto 2. Aún cuando el volumen de materiales de esta sección resultó menor que el del terraplén formado totalmente con materiales de “La Caldera”, el elevado costo de los acarreos de material desde el “Tarango” la hizo prohibitiva.

Al llegar a esta etapa del proyecto se concluyó que la alternativa más conveniente sería una sección semejante a la mencionada en el apartado 2; al mismo tiempo, el

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

exhaustivo trabajo para localizar bancos de tezontle mostró que los localizados en las proximidades de las poblaciones de Tezoyuca y Ocopulco reunían las condiciones escritas arriba, por lo que se procedió a revisar la sección mixta haciéndole algunas modificaciones, basándose para ello en el conocimiento que en esta etapa se tenía del comportamiento de los terraplenes de prueba.

- 1.- Incrustación inmediata durante la construcción del orden de 1 m, de arena limosa fina pesada.
- 2.- Una plantilla de maniobras o de trabajo con espesor de 1 m, constituida por el material producto del cribado del tezontle por la malla No. 4.
- 3.- Cuerpo del terraplén formado por el tezontle retenido en la malla No. 4.
- 4.- Bermas constituidas por material análogo al que formaría la plantilla de trabajo.
- 5.- Una protección contra el oleaje constituida por un enrocamiento.

Se presentan a continuación las directrices bajo las cuales se realizaron los análisis de estabilidad, habiéndose considerado básicamente:

- a.- Fallas rápidas al final de la construcción de los terraplenes.
- b.- Fallas a largo plazo.

En ambas se admitió la combinación de los efectos que sobre el análisis producirían las cargas muertas y vivas, así como de sismo.

Antes de describir con detalle los análisis de estabilidad se establecieron los criterios empleados para simular los efectos de carga viva y sismo.

1.- Carga viva: El proyecto imponía que la obra se construyera para el tránsito de vehículos H 20-S 16, cuyo efecto se asimiló a cargas concentradas de 5 ton/eje, con espaciamentos entre sí de 1.8 m, cuya magnitud consideraba efectos dinámicos y generación de fallas en abanico o de concha. Además, el exceso de presión de poro generado por la circulación de vehículos se consideró despreciable.

2.- Sismo: La zona se consideró de mediana sismicidad, por ello se utilizó en el diseño un coeficiente sísmico $c_s = 0.1$ y se supuso como movimiento crítico al ondulatorio.

DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS POR FALLA RÁPIDA

Para mejor comprensión se consideró que, durante esta posible falla, el exceso de presión de poro provocado por el peso del terraplén en los materiales del subsuelo presentaba su máximo valor.

Luego la condición de falla en los materiales del subsuelo estaría representada por pruebas triaxiales rápidas. Se adoptó como criterio para determinar las alturas

críticas que limitaban el flujo del subsuelo, la expresión: $H_c = \frac{4c_t}{\gamma_m}$

Donde:

H_c: Representa la altura máxima que puede soportar el subsuelo.

c_t: Resistencia al esfuerzo cortante en prueba rápida, tomando en cuenta su reducción.

γ_m: Peso volumétrico húmedo del material compactado.

La resistencia c_t consideraba el efecto por degradación en la estructura de los materiales del subsuelo debida a la aplicación rápida de la carga, a la elevada sensibilidad de los materiales del subsuelo y a la expulsión de sales de sodio existentes en el suelo durante la consolidación. Su magnitud se estimó en un 80% de la resistencia promedio determinada en el laboratorio en pruebas triaxiales rápidas y de compresión simple, lo que dio un valor de c_t = 1.3 ton/m².

En la Tabla 2 se presentan las alturas críticas (H_c) que finalmente se consideraron para los terraplenes formados con materiales de los bancos ya mencionados, así como sus propiedades mecánicas correspondientes.

Tabla 2. Alturas críticas (H _c) de materiales de distintos bancos				
(Alturas críticas de terraplenes)				
Material de banco	Fricción aparente	Peso volumétrico	Altura crítica	Altura verdadera considerando inmersión
	ϕ_a'	$\gamma_m (T/m^3)$	H _c (m)	(m)
Arena pesada ("La Caldera")	18°	1.8	2.50	4.0
Tezontle (Tezoyuca y Ocopulco)	35°	1.1	4.00	5.6
Arena ligera ("Tarango")	22°	1.1	4.00	5.6

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Las alturas críticas se calcularon como si toda la sección pasase con el peso volumétrico anotado, sin efecto de inmersión.

Teniendo presentes las consideraciones anteriores a las secciones definitivas formadas con tezontle (cuerpo) y arena pesada (plantilla), se consideró suficiente proyectarlas con un factor de seguridad F.S. mínimo igual a 1.1.

El análisis anterior tan sólo consideraba el efecto de carga muerta, el cual limitaba inicialmente la altura de los terraplenes por flujo del subsuelo; sin embargo, el talud de estos elementos solo fue posible definirlo al revisar la estabilidad por efecto combinado de cargas viva y muerta acumuladas. Para ello también se consideró la experiencia adquirida en la construcción de los terraplenes ubicados en la zona del Ex - Lago de Chalco, los que fueron estabilizados con bermas con coronas de 6.0 m, en algún lugar especial en el que así se requirió. Para definir la geometría de las secciones se realizó un minucioso análisis por el método sueco, aparece un ejemplo en el **Anexo 5**. El método sueco se aplicó utilizando el procedimiento de Casagrande para materiales puramente cohesivos y siguiendo los lineamientos indicados en el Capítulo II.

DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD A LARGO PLAZO

La justificación de este estudio correspondió básicamente a que el proyecto de los terraplenes bajo condiciones de falla rápida (capacidad de carga del subsuelo), se realizó al límite, suponiendo un comportamiento intermedio entre el estado elástico y el plástico de los materiales del subsuelo.

Lo anterior aunado a las fuertes incrustaciones que se presentaron, durante la construcción, del material de la plantilla dentro del subsuelo, obligando a la revisión de la estabilidad de los terraplenes a largo plazo, considerando este estado cuando el exceso de presión de poro inducido por la aplicación de los recargues fuera despreciable.

CRITERIOS DE FALLA ADOPTADOS PARA EL ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Como el estado del subsuelo a largo plazo se presentó por la eliminación casi total del exceso de presión de poro, las posibles condiciones de falla en los materiales

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

podían representarse por pruebas triaxiales del tipo consolidadas rápidas, cuyos parámetros de resistencia C_{cr} y ϕ_{cr} , según los resultados de las pruebas de laboratorio y los estadísticos realizados por el Dr. Raúl J. Marsal, eran 1.1 ton/m^2 y 16° respectivamente. Sin embargo la incertidumbre que se presentaba para conocer el significado físico, al determinar el factor de seguridad al deslizamiento durante los análisis, obligaron a utilizar en los análisis de estabilidad el principio de los esfuerzos efectivos, en el que la resistencia máxima al esfuerzo cortante en la superficies de falla del subsuelo estaba dada por:

$$S_f = c' + (\sigma - \mu)\tan\phi'$$

Donde la diferencia $\sigma - \mu$ representa los esfuerzos efectivos existentes en la superficie de falla, que para el caso que se analizaba estarían dados por la suma de los pesos parciales de los materiales arriba del nivel freático y los pesos sumergidos bajo dicho nivel.

Aún cuando no se efectuaron pruebas para medir los parámetros de resistencia efectiva c' y ϕ' , se adoptaron valores conservadores para el análisis de estabilidad definitivo, considerando para ello:

- a.- La forma cualitativa en la variación de los parámetros c' y ϕ' en arcillas de alta plasticidad tanto normalmente consolidadas como preconsolidadas.
- b.- Las características de sensibilidad de los suelos existentes.
- c.- La expulsión de sales de sodio existentes en el suelo.

Bajo estas consideraciones se acogieron como parámetros efectivos de resistencia al esfuerzo cortante los valores de:

$$c' = 1.0 \text{ ton/m}^2 \quad \text{y} \quad \phi' = 10^\circ \text{ (el más conservador de los recomendados)}$$

Finalmente la expresión para determinar el factor de seguridad crítica (F.S.), adoptando para el análisis el Método Sueco, se redujo a:

$$F.S. = \frac{M_R}{M_A} = \frac{c'LR_i + W_i y_i \text{tg}\phi'}{W_d b}$$

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Donde:

W_i : Peso de una dovela

y_i : Distancia de la base de la dovela al plano horizontal que pasa por el círculo con centro O_i .

W_d : Peso de desequilibrio.

b : Distancia del centro de gravedad del peso de desequilibrio al eje vertical que pasa por O_i .

Este análisis se efectuó exclusivamente para los terraplenes de prueba que por su tamaño y la magnitud de sus recargues futuros presentarían las condiciones más críticas de estabilidad a largo plazo. Dicho análisis resultó satisfactorio, obteniéndose un factor de seguridad de 1.47, con ello podía afirmarse con seguridad que los terraplenes del camino principal presentarían, a largo plazo y combinando efectos de carga viva y muerta, un factor de seguridad superior a 1.5.

De los análisis de estabilidad efectuados en los terraplenes considerando efectos combinados de carga viva, carga muerta y sismo, se concluyó que el efecto sísmico (tipo ondulatorio) influía reduciendo el factor de seguridad crítico calculado exclusivamente por carga muerta y viva, en un 10%.

Se anexa al presente un plano en el que se indica en forma gráfica y numérica la manera en que se realizaron los cálculos (**Anexo 6**).

NOTA: Cabe aclarar que dado a que el plano originalmente consultado estaba poco legible, se determinó realizar de nuevo el cálculo del F.S. con el Método Sueco y obtener así una mejor ilustración de dicho procedimiento. Esto derivó en que en la figura del **Anexo 6** el F.S. sea igual a 1.45, difiriendo del 1.47 obtenido en su momento, esto pese a que se consideraron los mismos datos.

3.5 Análisis de hundimientos

3.5.1 Descripción

Una vez que se definieron los materiales y la sección geométrica de los terraplenes en estudio, el siguiente paso fue encontrar su mejor distribución, proponiéndose las alternativas que se mencionan a continuación:

1.- Construcción de dos terraplenes separados una distancia mínima del orden de 100 m de centro a centro de línea; lo anterior tenía por objeto reducir la magnitud de los hundimientos ya que éstos estaban en función de las dimensiones de la base; sin embargo, el procedimiento de construcción de esta alternativa exigía la edificación, previa a los terraplenes, de un camino de penetración en las zonas II y III; en donde para una de las vías el bordo existente Peñón – Texcoco serviría para el caso, pero en la otra habría la necesidad de construir un nuevo camino. Lo anterior incrementaba la probabilidad de falla de los terraplenes en estudio, en virtud de que la banda que quedaba separada del bordo se hallaría totalmente en subsuelo virgen del Ex - Lago, además de que se colocarían protecciones contra oleaje en cada uno de los extremos de los terraplenes. También, y esto es muy importante, se perdería la ventaja de usar el bordo existente como camino central de construcción.

2.- Construcción de un solo terraplén que contuviera todas las bandas del camino, precisamente encima del bordo existente; esta alternativa tenía la incertidumbre de que la parte central del terraplén quedara sobre el suelo ya consolidado por el bordo y las laterales sobre el subsuelo virgen que no había estado sujeto a sobrecargas, produciéndose consecuentemente fuertes hundimientos diferenciales.

3.- Por último, se pensó en la posibilidad de construir los terraplenes que formaran el camino en estudio a cada lado del bordo ya construido; esta solución tenía las siguientes ventajas:

- a.- Facilitar su construcción utilizando al bordo existente como acceso.
- b.- Menor probabilidad de falla, pues solo se registraría en los lados extremos.
- c.- Menor costo en la protección contra el oleaje.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

d.- En virtud de que el subsuelo adyacente al bordo se había consolidado un poco por la sobrecarga propia del mismo, se originarían menores hundimientos que los correspondientes a la alternativa 1.

3.5.2 Evolución de hundimientos con el tiempo

De lo anterior se concluyó que la alternativa descrita en el inciso 3 era la más conveniente.

Con el fin de determinar los volúmenes que se utilizarían en la construcción de las terracerías que formarían el camino, se calculó la magnitud de los hundimientos que se experimentarían por el peso propio del mismo y la carga viva especificada; se consideraron los resultados cuantitativos de campo y de laboratorio. Las condiciones de frontera pensadas se resumen a continuación:

1.- El espesor deformable de los depósitos del subsuelo fue considerado en 35 m. Este espesor quedó definido a partir de la variación que con la profundidad presentaron las cargas de consolidación.

2.- La deformabilidad de los depósitos considerados del subsuelo se supuso constante.

3.- Se adoptó una distribución lineal de los esfuerzos impuestos por la sobrecarga del terraplén; máxima en la superficie y mínima en el extremo inferior de depósitos deformables.

4.- Las condiciones de drenaje se consideraron como drenaje libre en la superficie e impermeable en el extremo que se supuso limitado a los depósitos deformables.

5.- La permeabilidad en los depósitos deformables se consideró constante. El parámetro que la definía influía efectos bidimensionales de drenaje.

Con base en estas consideraciones la variación de los hundimientos con el tiempo para una sobrecarga dada, siempre y cuando no se sobrepasara el rango de esfuerzos que limitaba la carga de preconsolidación, se muestra en figuras que se presentan en los **Anexos 7 y 8**. Se estableció que la consolidación primaria se

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

desarrollaría en un periodo comprendido entre 6 y 8 años y que el 50% de esa consolidación ocurriría en un lapso de 10 meses.

La magnitud de los hundimientos (λ), bajo una carga efectiva impuesta por el peso del terraplén, se determinó a partir de la siguiente expresión:

$$\lambda = m_v \Delta \bar{p} H_e$$

Donde:

m_v : Módulo de compresibilidad volumétrica, igual a 0.025 m²/t.

H_e : Espesor efectivo de los depósitos deformables, igual a 35 m.

$\Delta \bar{p}$: Incremento de presión efectiva, la cual señala que existe una parte sumergida.

La sobrecarga impuesta por los terraplenes provocó hundimientos considerables que modificaron la altura de los mismos; en general, se pudo decir que el terraplén se hundiría a la mitad de su altura inicial incluyendo al material de incrustación; es decir, por ejemplo, para la sección propuesta en la zona II, incluyendo su incrustación, tenía una altura inicial de 4.50 m, por lo que llegaría a una altura final de 2.2 m.

Inicialmente se proyectaron los terraplenes para colocar los recargues en diferentes periodos, pero la experiencia adquirida llevó a la conclusión de que posiblemente se lograría resolver el problema constructivo sin recurrir a ellos. En los anexos alusivos, se presenta una secuencia de recargues previstos para una sección típica de las usadas en la etapa de proyecto, es una sección con material ligero (**Anexo 9**). De hecho, aunque la sección correspondía a los terraplenes de prueba es representativa del camino en sí.

3.5.3 Estudios de drenes de arena

Con el fin de proponer la solución más económica en las secciones que formarían el camino directo Peñón – Texcoco en las zonas II y III, se estudió la posibilidad de emplear drenes verticales de arena en la base del cuerpo del terraplén; lo anterior tenía por objeto acelerar el proceso de consolidación producido por la sobrecarga del terraplén y al mismo tiempo aumentar la resistencia del subsuelo.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

1.- Descripción: Para el proyecto de los drenes verticales de arena se estudió el desarrollo de la consolidación vertical con flujo tridimensional en un medio homogéneo e isótropo, empleando la solución propuesta por el Dr. Nabor Carrillo. El cuerpo de los drenes verticales se propuso que estuviera formado por arena media, de preferencia bien graduada y sujeta a las siguientes especificaciones:

- a) El diámetro efectivo D₁₀ debía estar comprendido entre 0.1 mm y 0.3 mm.
- b) El porcentaje del material que pasaba la malla 100, en peso, sería superior al 30%.
- c) El porcentaje que pasaba la malla 200, en peso, no sería superior a 5%.
- d) El 100% del material pasaría la malla #4.

2.- Ahorro en tiempo de consolidación: En la siguiente tabla (**Tabla 3**) se muestran los tiempos probables en los cuales ocurrirían los hundimientos bajo una sobrecarga dada por los terraplenes en estudio, producidos por la consolidación primaria.

Tabla 3. Tiempos probables de hundimientos		
% de Consolidación	Sin drenes (Tiempo en años) ⁺	Con drenes (Tiempo en años)
10	0.29	0.07
20	1.13	0.14
30	2.00	0.21
40	4.60	0.54
50	7.20	1.14
60	10.50	1.27
70	14.80	1.50
80	21.00	2.10
90	31.00	3.35

⁺ El tiempo de consolidación sin usar drenes, se calculó empleando la Teoría Unidimensional de Consolidación, lo que condujo a valores muy exagerados.

3.- Geometría: después de haber realizado un exhaustivo trabajo se llegó a la conclusión de que la geometría más adecuada para formar los drenes verticales de arena era la siguiente:

- a) Drenes de sección circular.
- b) Diámetro de 0.30 m.
- c) Longitud vertical a partir del nivel del terreno natural de 20.0 m.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

d) La relación del espaciamiento centro a centro de drenes entre el diámetro de ellos debía ser de 10; así también era conveniente que su distribución fuera en disposición triangulada, con triángulos aproximadamente equiláteros.

4.- Costos: Para llevar a cabo la construcción de los drenes se estudiaron diferentes procedimientos de construcción, eligiéndose de todos ellos, aquel que reunió las mayores condiciones de continuidad y economía. El procedimiento de construcción seleccionado consistió en la introducción de un mandril hincado con martillo de pilotes (Ejemplo en **Imágenes 6 y 7**).

5.- Drenes verticales del F. C. México – Acapulco: paralelamente al estudio del camino directo Peñón - Texcoco se estudió la construcción del F.C. México - Acapulco, con un tramo a través del Lago de Texcoco, para lo cual se decidió construir dos terraplenes de prueba a escala natural. En éstos se utilizaron drenes verticales, por lo que se dispondría en un plazo breve de un estudio detallado del comportamiento de esas estructuras en el Lago.

Tanto de la información bibliográfica original como de la que se obtuvo de los tramos de prueba del ferrocarril se concluyó que, en el Lago de Texcoco en una sección de tierra con drenes de arena, los asentamientos totales en cuanto a magnitud eran los mismos que sin drenes pero ocurrían a doble velocidad. Este hecho estaba en desacuerdo con los resultados teóricos (**Tabla 3**), que predecían una rapidez mucho mayor habiendo drenes, y con las experiencias inglesas, que en general indicaban menores ganancias de tiempo; en cambio, estaban acordes con la experiencia japonesa y californiana.

Con esos datos y teniendo en cuenta que el asentamiento total que el diferencial de este producía parecía ser lo que más influía en el éxito de una carretera, pero dado que la velocidad no era tan importante debido a que se podía dar inicialmente una sobreelevación amplia a las secciones que se construirían, se decidió no implementar drenes de arena en el camino directo, lo que significó una gran ventaja en el costo de la estructura.



Imagen 6. Equipo de hincado de pilotes



Imagen 7. Martillo para hincado de pilotes

Imágenes pertenecientes a la empresa Liebherr (<https://www.liebherr.com/>)

3.6 Tramos de prueba

3.6.1 Su necesidad

En los capítulos anteriores se mencionaron algunas razones que hicieron necesario pensar en no adoptar un criterio definitivo para el proyecto de la carretera directa Peñón – Texcoco, sin antes observar el comportamiento de algunas secciones de prueba de tamaño natural construidas expresamente. En resumen, las razones que hicieron necesaria esa inversión fueron las siguientes:

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

1.- La experiencia sobre la construcción de caminos con las características del que se estudiaba era escasa en el mundo entero. Por ello las teorías que la Mecánica de Suelos ofrecía en el momento no eran absolutamente confiables, ya que carecían, entre otras cosas, de confirmación experimental suficiente. Por otra parte, la experiencia anteriormente adquirida en casos menos críticos había de explicarse con cautela, pues se sabía que la extrapolación experimental siempre era peligrosa.

2.- Verificar las secciones de proyecto de manera que pudiera tenerse una relativa garantía de no provocar fallas durante la construcción.

3.- Verificar los asentamientos calculados teóricamente para las secciones de proyecto.

4.- Obtener una idea precisa de cuál podía ser la evolución de los asentamientos con el tiempo.

5.- Definir de una manera más realista las posibilidades de lograr una sección inicial que produjera la sección final mínima, que no requiriera de recargues de material en momentos posteriores a la puesta en servicio del camino.

6.- Ensayar la manejabilidad de los materiales seleccionados, especialmente en lo referente a estabilidad en el agua y su compactación.

7.- Ensayar procedimientos de construcción.

8.- Comprobar los efectos de la erosión, del oleaje, etc.

A juicio de las autoridades de la SOP, estas razones justificaron la realización de los tramos de prueba que se construyeron a escala natural.

3.6.2 Características de los tramos

Los tramos de prueba tenían una diferencia con respecto a los terraplenes prototipo, que era la existencia del bordo Peñón – Texcoco y que sería usado como camino de construcción, quedando alojado en el eje de simetría de los segundos. Se consideró que esa diferencia no introduciría variantes de comportamiento substanciales entre modelo y prototipo.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Por todas las consideraciones que se habían realizado, se decidió construir un terraplén con material pesado y otro con material ligero, dando a ambos inicialmente la altura máxima compatible con la consistencia del terreno de cimentación y no excediendo el valor necesario para que una vez producido el asentamiento quedase una sección mínima requerida. El terraplén de material pesado fue construido con material proveniente del banco “El Risco”, cuyo peso volumétrico se consideró de 1.6 t/m^3 . El terraplén de material ligero debía construirse con tezontle en los niveles sobresalientes del agua; sin embargo, por ser el material de “El Risco” más económico por sus acarreos que el de cualquier banco de tezontle disponible, se decidió construirlo también con material de “El Risco”, haciendo la correspondiente correlación entre los respectivos pesos volumétricos y alturas, de tal suerte que las presiones aplicadas fueron en definitiva las mismas que si se hubiera utilizado el tezontle.

Las alturas de los tramos de prueba fueron de 4.5 m en el terraplén con material pesado y 3.60 m en el terraplén con el material ligero, construido en realidad con material del “Risco”, lo que representó aproximadamente 4.50 m de una sección con tezontle. Estas alturas estuvieron formadas como sigue: en algunos tramos el primer metro inferior se incrustó de inmediato en el fondo lodoso del lago al ser colocados a volteo. En los terraplenes de prueba este primer metro fue de material arenoso procedente del banco “El Risco”; en seguida venía en ambos terraplenes, otro metro del mismo material, necesario para tener una plantilla fuera del agua. Arriba de esto hubo 2.50 m del mismo material del “Risco” en el terraplén pesado y 2.50 m de tezontle figurado por 1.60 m realmente colocado de material del “Risco”, en el ligero.

La capacidad de carga en el terreno de cimentación fue:

$$q_c = 4c \quad \text{y} \quad c = 1.3 \text{ t/m}^2.$$

Entonces:

$$q_c = (4)(1.3) = 5.2 \text{ t/m}^2.$$

La sección pesada comunicaba al terreno:

$$\text{Bajo el agua (suelo sumergido): } 2.0 \text{ m} \times 0.6 \text{ t/m}^3 = 1.20 \text{ t/m}^2$$

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

$$\text{Sobre el agua: } 2.5 \text{ m} \times 1.6 \text{ t/m}^3 = 4.00 \text{ t/m}^2$$

$$\text{Total: } 5.2 \text{ t/m}^2$$

La sección ligera comunicaba al terreno:

$$\text{Bajo el agua (suelo sumergido): } 2.0 \text{ m} \times 0.6 \text{ t/m}^3 = 1.20 \text{ t/m}^2$$

$$\text{Sobre el agua (tezontle): } 2.5 \text{ m} \times 1.1 \text{ t/m}^3 = 2.75 \text{ t/m}^2$$

$$\text{Total: } 3.95 \text{ t/m}^2$$

Nótese que la sección pesada quedó en la capacidad de carga límite, lo que se consideró aceptable para el terraplén de prueba (que incidentalmente no tuvo ninguna falla, los que sí las tuvieron aunque pequeñas fueron sus caminos de acceso, contruidos de menor altura, sin bermas y sin tantas precauciones), pero no fue aceptable para el camino por el temor a provocar fallas de consideración. La sección ligera con la misma altura, por el contrario, aplicó una presión bastante menor (75% de la primera), con lo que tuvo cierta seguridad por capacidad de carga y se asentó menos, sin embargo fue importante. De hecho con la sección ligera así planteada se esperó llegar a la situación idónea de que se produjera la sección necesaria de proyecto después de asentarse, sin recargues, en tanto que la sección pesada requeriría de éstos. Fue evidente, al juzgar este panorama que la conveniencia del uso de la sección ligera para el camino definitivo se imponía también desde este punto de vista.

Las dos secciones de las que se ha hablado se presentan en los croquis del **Anexo 10**, en él se muestran únicamente las partes sobresalientes del agua, sin tomar en cuenta la capa incrustada, ya que corresponde a cálculos efectuados antes de construir los terraplenes de prueba y, por lo tanto, antes de conocer el espesor de incrustación y otros detalles.

Se admitió un valor del factor de seguridad relativamente bajo, igual a 1.10 por razones de orden económico. Es conveniente aclarar que este factor de seguridad fue respecto a la falla dada e involucró carga muerta, carga viva y efecto sísmico (suponiendo una aceleración sísmica de 0.1 g). Ello equivalía aproximadamente a un factor de seguridad de 1.25 para la combinación de cargas viva y muerta y de 1.40,

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

como mínimo, si solo se tomaba en cuenta la carga muerta. El criterio en general se estimó muy razonable.

Decidida la construcción de los dos terraplenes de prueba de 100 m cada uno, se procedió a ubicarlos, para lo que se consultó el perfil de asentamientos del bordo existente en la México – Texcoco, tratando de colocarlos donde esos asentamientos fueran máximos, señal de la máxima deformabilidad en el terreno. Como consecuencia resultaron las ubicaciones en el km 4+060, con origen en un punto predeterminado de la Unidad San Juan Aragón.

Los terraplenes de prueba se completaron el 15 de diciembre de 1965, se tomaron frecuentes mediciones sobre ellos. De hecho, durante su construcción se había comenzado intensamente esa tarea a fin de conocer la evolución de las estructuras desde un principio, especialmente en lo referente a asentamientos.

3.6.3 Instrumentos de medición

A.- Ubicación

1. Con el objeto de conocer el comportamiento real de los terraplenes de prueba, se instalaron diversos elementos de medición, los cuales se indican a continuación:

a.- Instrumentos con los que se pretendía conocer los efectos del estado de esfuerzos impuestos al suelo por el peso del terraplén, en cuanto a su estabilidad.

Para tal objeto se instalaron dos secciones de inclinómetros en cada uno de los tramos con la distribución que se indica en los planos de los **Anexos 11 y 12**. Los inclinómetros empleados fueron los que al respecto diseñó Wilson, los cuales permitían la medición tanto de los desplazamientos laterales como de los verticales; para este último caso se hizo necesario que los coples de unión fueran de tipo telescópico. El número total de inclinómetros instalados fue de 28, de los cuales la mitad tenían elementos de unión fijos y en la otra mitad sus uniones eran móviles.

b.- Instrumentos para medir los asentamientos y su evolución.

+ *Bancos de nivel*: en cada uno de los tramos de prueba se colocaron 5 secciones de bancos de nivel esparcidas entre sí 20 m; cada sección constaba a su vez de 5

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

bancos espaciados a cada 8 m; adicionalmente se instaló un banco de nivel de referencia fuera de la influencia de los terraplenes. En total se instalaron 26 bancos en cada terraplén de prueba. Dichos bancos eran de tipo superficial, consistiendo de una zapata de concreto de 30 x 30 cm y 10 cm de espesor, apoyada al nivel del terreno natural y en la cual se ancló un tubo de hierro galvanizado de 1" de diámetro; este tubo para no interferir con la construcción se colocó en tramos, según las necesidades exigidas por el procedimiento de construcción del terraplén.

Se efectuaron nivelaciones periódicas cuyos resultados disponibles se describen en el último inciso de este capítulo.

+ *Piezómetros*: con el objeto de medir las variaciones de la presión en el agua y su evolución con el tiempo como consecuencia de las cargas aplicadas, se instalaron 6 piezómetros en cada uno de los terraplenes de prueba, a profundidades que variaron de 5 a 30 m. Para la construcción de estos aparatos se utilizó un diseño de tipo neumático que ya había sido empleado con éxito en nuestro medio, sin embargo, tuvieron que hacerse modificaciones de cierta importancia, con el objeto de evitar desperfectos durante su funcionamiento, debido a la salinidad del agua del lago.

+ *Deformímetros verticales*: con el fin de medir la magnitud de los hundimientos a diferentes profundidades del manto deformable, se dispusieron en los tubos instalados en cada pozo de observación coples de unión de tipo telescópico en cada tramo de 50 m. Mediante un dispositivo especial fue posible medir el hundimiento diferencial de cada capa de 1.50 m de espesor. Este dispositivo al igual que el inclinómetro antes mencionado fue adquirido en una empresa estadounidense especializada, que fabricaba los diseños elaborados por Wilson (creador de los inclinómetros). De hecho la combinación del inclinómetro con el deformímetro permitía conocer los movimientos medidos en sus tres direcciones en el centro de cada capa de 1.50 m de espesor.

B.- Descripción de los instrumentos

+ **Inclinómetro**: Para determinar horizontalmente la posición de los puntos de control de la red de medición, dentro de los pozos de observación se utilizó un inclinómetro

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

eléctrico, el cual consistía fundamentalmente de un circuito Puente de Wheatstone de tipo convencional (**Imagen 7**), actuado por medio péndulo, la mitad del cual se alejaba en el extremo de la sonda dentro de un recipiente hermético de forma aproximadamente cilíndrica, de 6 cm de diámetro por 46 cm de longitud, en tanto que la otra mitad del puente estaba contenida dentro de la caja de control. Dentro de la sonda el péndulo podía oscilar libremente en un plano, llevando en su extremo inferior una lengüeta flexible, cuyo extremo libre al oscilar el péndulo, movía un contacto eléctrico frente a un elemento resistivo de precisión de forma de arco circular. Para que se estableciera el contacto se requería conectar la sonda a la caja de control y oprimir un interruptor, con lo que actuaba el revelador. De esta forma el péndulo subdividía la resistencia en dos partes en el plano de medición en una relación que dependía de la posición de la sonda respecto de la vertical. En el revelador actuaba también un freno. A través del interruptor mencionado se alimentaba también el circuito Puente de Wheatstone y el galvanómetro sufría ordinariamente una desviación respecto de su posición central de reposo a la que se le podía regresar ajustando debidamente la resistencia, cuyo vástago de control se encontraba acoplado directamente a un contador mecánico. La lectura que aparecía entonces en el contador dependía de la desviación de la sonda respecto de la vertical.

La sensibilidad de ajuste del puente podía aumentarse oprimiendo un segundo interruptor. La sensibilidad del inclinómetro era de aproximadamente un minuto por cada unidad en el contador mecánico de vueltas. La precisión era de más o menos 3' y podía medir ángulos entre $+11^\circ$ y -18° .

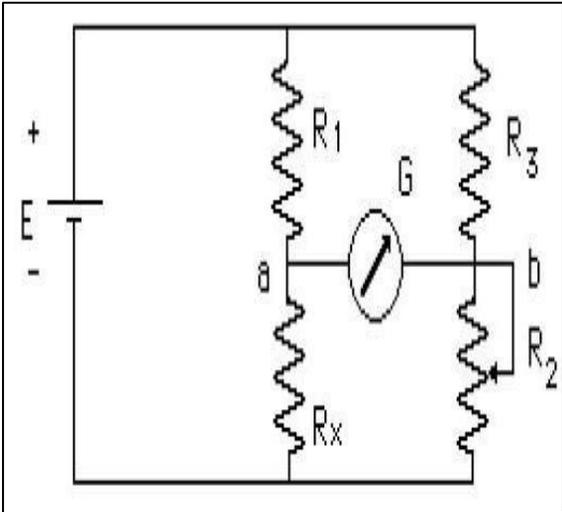
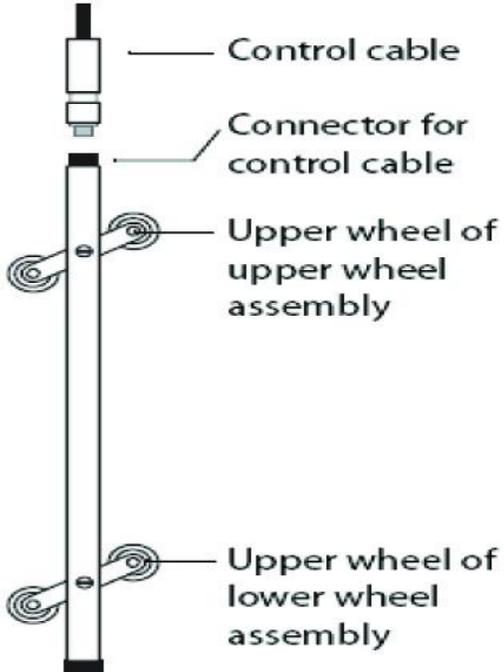
La sonda se deslizaba libremente dentro de la tubería de ademe por cualquiera de dos de sus carriles diametralmente opuestos, mediante cuatro ruedas (**Imagen 8 e Imagen 9**). La medición se refería al carril en el que se apoyaban las dos ruedas cuyo eje estaba rígidamente unido a la sonda, en tanto que las otras que se soportaban sobre columpios con resorte, proporcionaban la fuerza necesaria para mantener en contacto a las primeras con su carril y ayudaban a orientar el

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

inclinómetro en el plano adecuado. El cable de la sonda tenía un armado especial para mantener sustancialmente su longitud, esto permitía determinar la profundidad de la sonda cuando se encontraba dentro de un pozo de observación. Para introducirla al pozo de observación se utilizaba una polea que estaba acoplada directamente sobre la tubería de ademe o a una extensión adecuada.

Las lecturas no se vieron afectadas de forma importante por cambios en la condición del funcionamiento de las pilas, ello debido al tipo de circuito con el que estaba construido el instrumento. Así mismo, la dependencia de las lecturas con la temperatura fue baja aún cuando existía variación de temperatura entre la sonda y la caja registradora, sin embargo esto obligaba a mantener la caja de control siempre a la sombra durante las determinaciones y a evitar cambios bruscos de temperatura en la misma. Si hubiera ocurrido una compensación incompleta de temperatura podría haberse observado un ligero corrimiento en la lectura correspondiente, dicha modificación en la lectura podía alejar de la realidad la información obtenida. Para corregir este error las lecturas se hacían en posiciones conjugadas respecto de la vertical, esto se lograba girando 180° sobre su eje la posición del inclinómetro, una vez efectuadas las lecturas y procediendo a repetir dichas lecturas a los mismos niveles en que se efectuaron anteriormente. Las inclinaciones se determinaban en función de las diferencias de los valores absolutos de las posiciones conjugadas.

En el caso de los terraplenes de prueba que se analizaron, las tuberías habían quedado embebidas en capas de mantos deformables, por ello no era posible tener una base fija de referencia. Se juzgó pertinente hacer un levantamiento topográfico de precisión de las bocas de las tuberías, las que servían de referencia, tanto inmediatamente después de instaladas como posteriormente en forma periódica.

 <p>Las resistencias R1 y R3 son resistencias de precisión, R2 es una resistencia variable calibrada, R_x es una resistencia bajo medición y G es un galvanómetro de gran sensibilidad.</p>	
<p>Imagen 7. Puente de Wheatstone</p> <p>Representa el esquema eléctrico del inclinómetro. Imagen tomada de https://www.electricasas.com/</p>	<p>Imagen 8. Ruedas adheridas a sonda</p> <p>Ejemplo de las ruedas de la sonda del inclinómetro, las cuales se insertan en la carcasa. Imagen de "Figure 2" de Transportation Research Circular Number E-C129.</p>

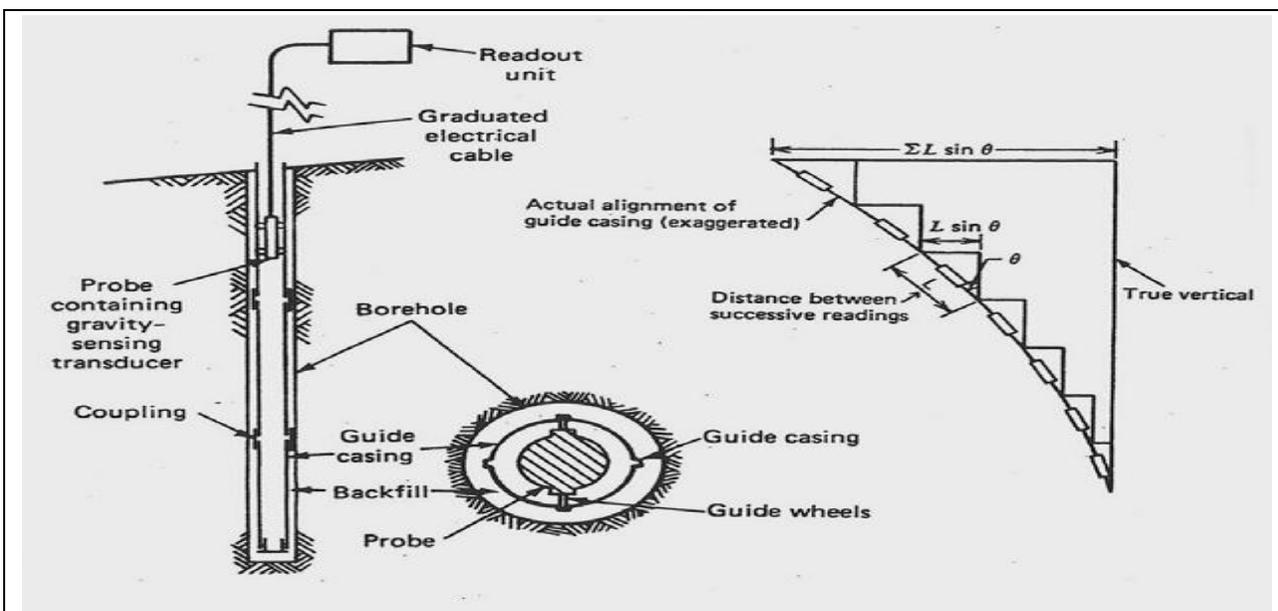


Imagen 9. Esquema de la sonda del inclinómetro insertada en la carcasa instalada para monitorear las deformaciones del suelo. (Imagen de "Figure 2" de Transportation Research Circular Number E-C129, (2008))

Calibración del inclinómetro

Esta operación se efectuó bajo condiciones de temperatura análogas a las de operación en el campo, es decir, de aproximadamente a 18° C.

La calibración propiamente dicha consistió en sujetar el inclinómetro al eje de un tránsito especialmente adaptado para tal efecto y por su medio se le fue colocando en diversos ángulos de inclinación. Previamente se le hicieron los ajustes y correcciones necesarios al tránsito, se le niveló cuidadosamente, se puso en cero el círculo vertical y se colocó el inclinómetro de 10' en 10' hasta 8° en un sentido y en el opuesto. En cada posición se tomaron cuidadosamente las respectivas lecturas en la caja de control. El sujetador tuvo la disposición adecuada para hacer coincidir la lectura correspondiente a la vertical o a la posición "O".

Antes de iniciar la calibración se revisaban los registros de las últimas mediciones. De esta forma se tuvo una población numerosa de valores determinados para la constante, pudiéndose alcanzar una alta precisión en su cálculo.

Posteriormente se contó con un programa para el cálculo de la constante con base en los datos de calibración y mediante el empleo de máquinas electrónicas.

El valor de la constante pudo ajustarse por medio del potenciómetro. Se tuvo presente que por forma de diseño el potenciómetro no sólo ajustaba la constante de calibración, sino que también corría la lectura a "O".

+ Deformímetro vertical de Wilson (Imágenes 10 y 11): Este instrumento constaba de una caja metálica cilíndrica, que exteriormente era semejante a la del inclinómetro, unida a una cinta de acero para medir.

El sistema era puramente mecánico y la punta de la sonda presentaba las siguientes características: en el extremo inferior tenía un par de ruedas diametralmente opuestas, una de ellas con el eje fijo a la caja y la otra con el eje soportado en un columpio dotado de un resorte. En la parte superior tenía un par de ruedas contenidas en el mismo plano de medición que las inferiores, montadas en patas dispuestas hacia arriba en forma de "V", a las que por un sistema de resortes se les mantenía abiertas cuando se les hacía funcionar.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Este dispositivo se empleó en los pozos de observación dotados de un cople del tipo telescópico para determinar los asentamientos diferenciales en tramos de 1.50 m.

El instrumento se deslizaba fácilmente apoyado mediante sus ruedas en los carritos opuestos de la tubería, pasando de un tubo a un cople en movimiento descendente; al tratar de extraerlo hacia arriba las patas de la parte superior se trababan contra el fondo del tubo más próximo, permitiendo una sujeción firme y precisa para medir la profundidad a la que se encontraba.

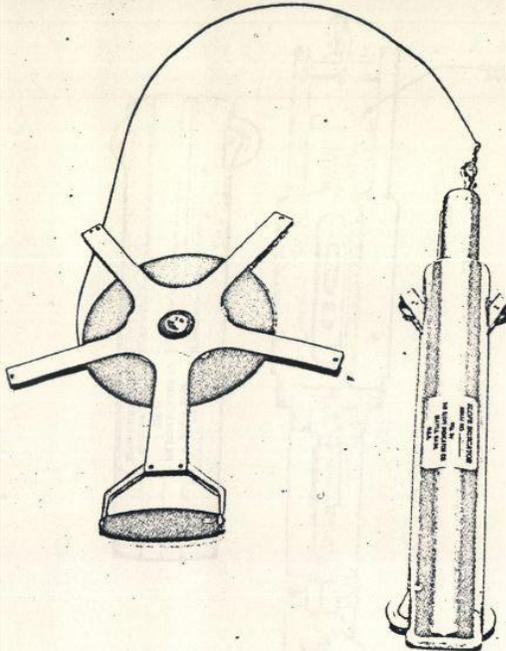
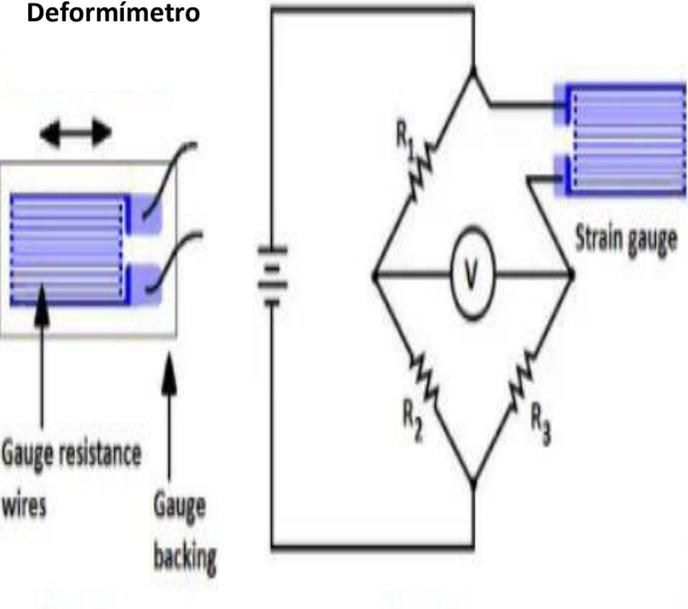
El aparato contenía en su interior un mecanismo que podría describirse como una trampa formada por un conjunto de resortes, la cual se liberaba por medio de una sacudida regular del deformímetro hacia arriba, esta operación hacía que las patas se retrajeran dentro de las ranuras que para tal efecto estaban dispuestas en la cabeza del aparato. De esta forma el deformímetro podía ser extraído hacia el exterior libremente.

Este mismo efecto se podía lograr si el dispositivo golpeaba firmemente contra un cuerpo sólido en caída. Por este motivo se adoptó el procedimiento que se empleaba en problemas similares en la Comisión Hidrológica del Valle de México, y que consistía en colocar un pasador dentro de la tubería en su último tramo.

Debido a que podían presentarse fallas en los mecanismos a causa de los efectos de corrosión predominantes en el agua del lago, se construyó un dispositivo que permitía accionar el mecanismo de cierre.

El deformímetro vertical no requería de una calibración propiamente dicha si la cinta estaba previamente comparada, sin embargo, sí era menester determinar la constante para corregir las lecturas por error de índice.

Si se iban a referir las lecturas a la boca de la tubería, la primera lectura debía coincidir con la longitud del primer tramo de tubo, pero en virtud del dispositivo que se requería para introducir el aparato, fue necesario corregir las lecturas correspondientes. En cada caso la constante se determinó restando de la lectura correspondiente las longitudes del tramo superior de la tubería y del dispositivo para introducir el aparato.

	<p>Deformímetro</p> 
<p>Imagen10. Torpedo del deformímetro</p>	<p>Imagen 11. Armado del deformímetro (Strain gauge)</p>
<p>Dibujo contenido en documento de la SOP.</p>	<p>Esquema tomado de la página https://www.electrical4u.com/strain-gauge/</p>

+ Piezómetros (Anexo 13): Los piezómetros neumáticos utilizados en los tramos de prueba en cuestión, tuvieron como antecedente inmediato un diseño del laboratorio de Obras Civiles dependiente de la Comisión Federal de Electricidad. Dichos aparatos eran adecuados para las mediciones estáticas de presión en el agua contenida en suelos finos.

El piezómetro utilizado consistió fundamentalmente en un sistema de aire en el que la circulación se efectuó a través de una tubería, dependía de una válvula de diafragma sensible a la presión del agua en el suelo. El diseño mencionado sufrió modificaciones principalmente en cuanto a materiales de construcción se refirió; dichas modificaciones se idearon para tener una resistencia química adecuada en la aplicación específica de los terraplenes de prueba sobre el Lago de Texcoco.

El piezómetro neumático de plástico utilizado y su sistema de medición pueden describirse como se indica a continuación: Por medio de una consola portátil que contenía un tubo de aire comprimido desecado, un regulador de presión, válvulas,

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

dos manómetros y un recipiente con agua para detectar el paso de aire, se proporcionó aire a través de tuberías adecuadas a un piezómetro determinado.

Se muestra un esquema del piezómetro ya instalado. El aire entraba distribuyéndose en forma de películas a través del ranurado de la superficie inferior entre ella y la membrana de Teflón de 1-32'', finalmente pasaba por un pequeño orificio central hacia arriba, al conector correspondiente nuevamente hasta la superficie donde se encontraba la consola.

La membrana tenía una deformación limitada; hacia arriba y hacia abajo por una piedra porosa que se encontraba superada tan solo por una rondana.

De esta manera las presiones en el aire para una condición que se estandarizó, fueron una medida de la presión del agua que obraba bajo la membrana. La presión del aire se midió cuidadosamente en la consola por medio de dos manómetros de precisión tipo Bourdon, que se comparaban frecuentemente con patrones de laboratorio. La precisión de las mediciones debía ser congruente con el orden de valores del exceso de presión hidrostática que se estaba determinando. Esto representó en general que el sistema debía ser capaz de determinar incrementos del orden de $0,03 \text{ kg/cm}^2$ o menores, para presiones hidrostáticas que fluctuaron entre $0,5 \text{ kg/cm}^2$ y 0 kg/cm^2 ; por esta razón se especificó para la consola el empleo de manómetros de prueba de alta precisión, especialmente para reconocer las etapas próximas a la consolidación.

Se especificaron los siguientes materiales para los piezómetros (para resistir químicamente el agua con carbonato de sodio y cloruro de sodio en concentraciones de 17% que causaba un pH de 13 aproximadamente):

- Piezas y conectores preferentemente en resina acetálica. Bajo ciertas condiciones podían sustituirse por ciertos tipos de acrílico, de preferencia transparente.
- Piezas en cloruro de polivinilo rígido de alto impacto.
- Membrana medidora y rondanas espaciadoras de Teflón.
- "C" Rings de hule de neopreno o hule de silicón.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

- Conectores en resina acetal y eventualmente de metal inoxidable revestido con hule sintético o un material semejante.
- Tubería para instalar el piezómetro dentro de la cual quedaban protegidas las mangueras del aire, de P.V.C. rígido de alto impacto.

CALIBRACIÓN DE LOS PIEZÓMETROS

En el esquema se muestra el sistema de dispositivos que se empleó para la calibración de los piezómetros (**Anexo14**). Dicho sistema constó de las siguientes partes:

- (1) Tanque alimentador de aire.
- (2) Cámara para aplicar presión exterior al piezómetro.
- (3) Dos manómetros de mercurio, uno para medir la presión de la cámara y el otro para medir la presión interior dada al piezómetro.
- (4) Tubo de salida de aire del piezómetro a un matraz kitasato de 1000 cm³.
- (5) Tanque para decantar el agua incluida en el aire a presión.
- (6) Piezómetro.

La cámara para aplicar la presión exterior al piezómetro se constituyó por una tapa diseñada especialmente para ajustarse de tal manera que, de existir fugas en el dispositivo, éstas fueran visibles desde el exterior. La operación de calibración propiamente dicha consistía en ir aplicando distintas presiones a la cámara, controladas con su respectivo manómetro de mercurio, lo que inducía a la membrana del piezómetro una deformación que se equilibraba mediante la introducción de aire por el conducto que llegaba al piezómetro por la parte superior. El equilibrio se lograba cuando al despegarse la membrana, se empezaban a desprender burbujas por el tubo que conducía al matraz. El burbujeo producido se controló a 4 burbujas por segundo; una vez establecido el régimen de burbujas, se procedía a leer la presión correspondiente al manómetro del piezómetro.

En lo que se refiere a los manómetros empleados en el campo también se requirió de una calibración similar a la descrita y se procuró emplear los mismos manómetros de

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

mercurio con el objeto de tener una alta precisión en ellos, se presenta una gráfica de calibración (**Anexo 15**).

C.- Instalación de los instrumentos

+ Inclinómetros (Imagen 12-a e Imagen 12-b):

1.- Perforación: Las perforaciones tuvieron un diámetro de 6'', debiendo ejecutarse por medio de una máquina perforadora con la herramienta de ataque adecuada. Las perforaciones se debían hacer con mucho cuidado, a fin de que las paredes del pozo fueran verticales en toda su longitud. Era de esperarse que las paredes del pozo fueran estables y se conservaran en buenas condiciones para permitir la instalación de la tubería de aluminio. En caso contrario se recurriría al método más apropiado para llevar a cabo esa estabilización. Otro aspecto que se tomó en cuenta fue que el pozo tenía que quedar limpio completamente de materiales, principalmente en el fondo.

2.- Colocación de la tubería de aluminio: Antes de colocar el tubo en el pozo se le debía orientar colocando un par de ranuras según una dirección determinada. Debido a que el eje del camino tenía una dirección que se aproximaba a la correspondiente E-W (20°) y el eje transversal del camino a la N-S, primero se tomaron dos medias secciones de tubo que se juntaban de manera tal que el macho de una de las secciones se insertaba en la media sección opuesta. Se debía tener la seguridad de que los dos extremos del tubo quedaran emparejados. Luego se colocaban los cinchos para sujetar las dos piezas aproximadamente en los tercios de cada tubo. Con las pinzas plegadoras se apretaba el reborde extremo de las juntas longitudinales aproximadamente a una pulgada de cada extremo del tramo de 1.5 m de longitud. Esto se hacía con el objeto de aumentar la resistencia a la torsión del tubo, evitando movimientos a lo largo de la junta longitudinal.

En el extremo inferior de este primer tramo se colocaba un tapón de aluminio, el cual quedaba sujeto por medio de tornillos. Este tapón era de forma cilíndrica, a manera que penetrara en el tubo de aluminio. En el mismo extremo inferior y cubriendo el tapón se debía colocar otro cincho sujetador.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Para iniciar la instalación del tubo dentro del pozo se bajaba la primera sección, de 1.5 m de longitud, con el tapón de aluminio en su extremo inferior y con las ranuras orientadas según la dirección prevista. Una vez introducido en el pozo el primer tramo de tubo, se colocaba una mordaza de aproximadamente 15 a 30 cm en la parte superior de éste. Se ponía otro tramo de tubo verticalmente sobre el anterior procurando que sus ranuras quedaran alineadas. Después se le ponían cinchos en ambos extremos del cople y otro aproximadamente en los tercios del tubo.

Se ponía otra mordaza cerca de la parte superior del nuevo tramo, se quitaba la mordaza de abajo y se bajaba nuevamente el tubo dentro de la perforación. En esta misma forma se iban repitiendo las operaciones hasta que el tubo descansaba sobre el fondo del pozo. Si el tubo sobresalía mucho de la superficie del terreno, se podía cortar por medio de una segueta hasta tener una altura que coincidiera con una marca, ello con el fin de facilitar las mediciones de profundidad.

3.- Relleno: Con el objeto de fijar el tubo al suelo circundante, se necesitaba hacer un relleno en el espacio comprendido entre el tubo y las paredes del pozo.

Este relleno se podía lograr empleando una arena limpia. Se dejó caer la arena libremente en el espacio anular con movimiento rotacional para uniformizar la caída en el fondo. Para compactar el material se utilizó un vibrador de concreto que se sujetó a la parte superior del tubo de aluminio y se puso a funcionar desde el primer momento en que se arrojó la arena al pozo. Esta compactación fue muy importante porque evitaba deformaciones posteriores tanto verticales como horizontales **(Imagen 12-c)**.

4.- Si se daba el caso de que todavía no existiera el terraplén cuando se instalaba la tubería, se continuaba la conexión hasta alcanzar un nivel que correspondiera a la altura rasante. A medida que avanzaba la construcción del terraplén se debía hacer un relleno con arena alrededor del tubo. El diámetro del relleno de arena sería de 6" aproximadamente **(Imagen 12-d)**.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

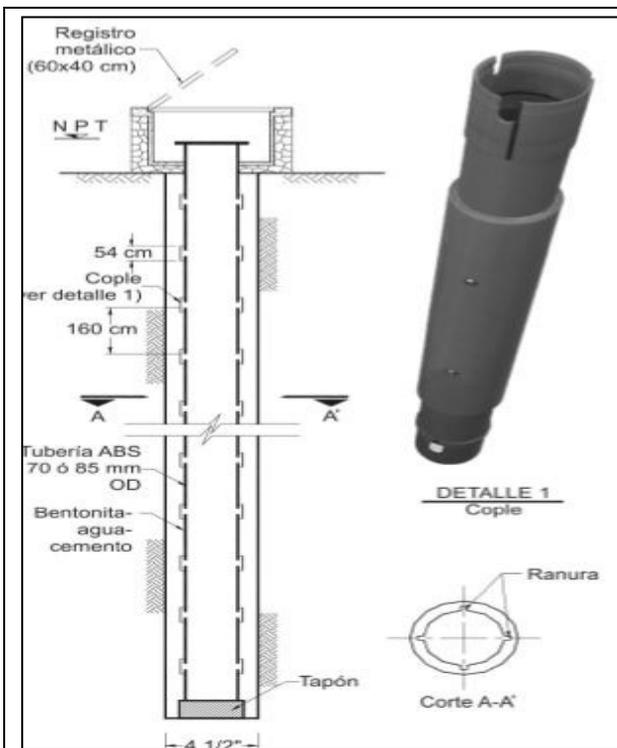


Imagen 12-a Ejemplo de inclinómetro vertical.



Equipo de inclinómetro

Imagen 12-b Relleno con arena alrededor de la tubería.

Imágenes de Figura 5 del artículo "Instrumentación geotécnica de una autopista en suelos blandos", SMIG.

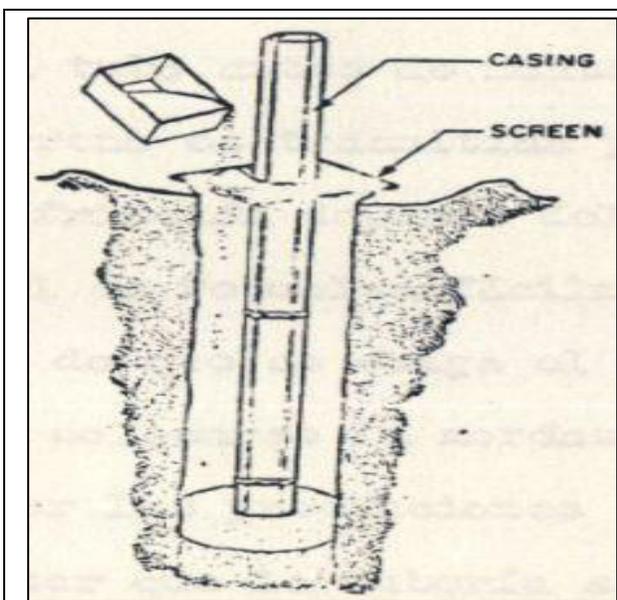


Imagen 12-c Relleno con arena alrededor de la tubería.

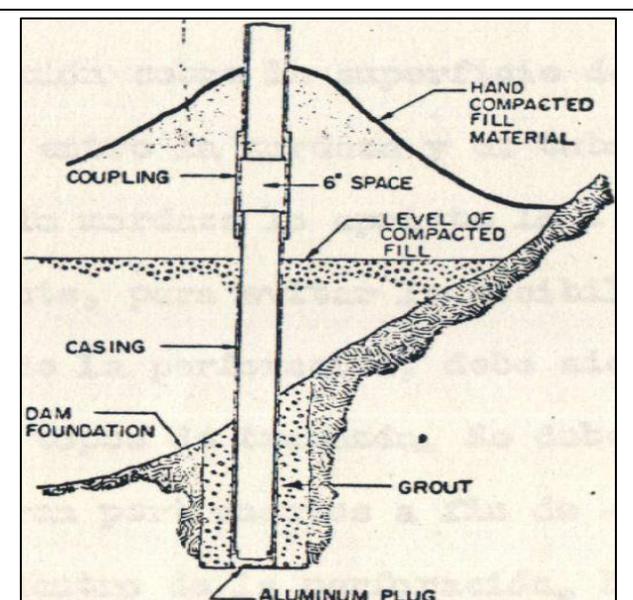


Imagen 12-d Colocación de tubería en puntos en las que aún no se construía terraplén.

Dibujos originalmente presentados en "Camino directo Peñón – Texcoco, estudios para proyecto" de la SOP.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

5.- El peso del tubo de aluminio era alrededor de una libra por pie lineal. Al introducirlo en la perforación, que tenía agua en el interior, disminuía su peso. Este peso resultante debía ser cargado por el cople en la parte superior y por la mordaza. La carga del tubo, antes de montar la nueva sección sobre la superficie del terreno, era transmitida por la fricción entre la mordaza y el tubo. La fricción dependía del grado en que la mordaza se apretara, lo cual se resolvía fácilmente. No obstante, para evitar la posibilidad de que se cayera el tubo al fondo de la perforación, siempre debía colocarse la mordaza debajo de los topes de trabazón. Se debían tomar las precauciones que se consideraran pertinentes a fin de evitar que la tubería se cayera dentro de la perforación. En virtud del peligro de que las ranuras quedaran fuera de alineamiento, se recomendó una inspección ocular después de que se asegurara cada sección de tubo. Esto se hizo iluminando el interior de la tubería.

Operación del inclinómetro

1.- El dispositivo de medición en su conjunto lo constituían una caja de control, que era la pieza en donde se encontraban la masa móvil y la resistencia circular principalmente, y el inclinómetro. Tanto el inclinómetro como la caja de control estaban conectados por un cable en donde se tenían unas marcas equidistantes a un pie y otras marcas a cada cinco pies. El inclinómetro tenía dos juegos de ruedas exteriores que le servían para guiarlo a través del tubo de aluminio, estaba diseñado de manera que la componente de inclinación en el plano definido por las cuatro ruedas era directamente proporcional a la lectura del potenciómetro cuando el circuito estaba en equilibrio. Las cuatro ruedas que llevaban al inclinómetro debían conservarse limpias y girar libremente. Cuando el instrumento se encontraba en operación, se debía aceitar una vez al día.

2.- Antes de iniciar la medición por medio del inclinómetro, se quitaba el tapón protector de la cabeza y el correspondiente al extremo del cable. Se conectaba el cable de control al inclinómetro y se apretaba la junta por medio de una llave especial. Esta junta debía quedar impermeable. Después el cable se debía conectar a la caja de control.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Por lo general se tomaban inicialmente tres lecturas por cada tubo de 5 pies, de esta manera los intervalos iniciales podían ser a las profundidades de 1', 2.5', 4.0', 6.0', 7.5', 9.0', 11', etc. La distancia al instrumento tal y como estaba marcada en el cable se refería al punto medio entre las ruedas.

En el suelo se procuraba que las lecturas se hicieran a una menor distancia, pudiendo ser cada 15 cm dentro de la zona crítica. Esto definiría mejor los límites de la zona de movimiento y el movimiento máximo.

Se introdujo el inclinómetro en el pozo y se mantuvo estacionario a la profundidad requerida. Las profundidades eran referidas a las marcas del cable de control. Después de un intervalo de 5 segundos aproximadamente, se oprimía parcialmente el interruptor de control y se hacía un ajuste tosco del galvanómetro con el microcuadrante. Luego se oprimía un poco más el interruptor de control para un equilibrio afinado del circuito. Se soltaba enseguida el interruptor para permitir al péndulo oscilar libremente y pasados unos 3 segundos aproximadamente se cerraba de nuevo. El microcuadrante no requeriría un ajuste posterior para una lectura CERO del galvanómetro si el péndulo había quedado en reposo; sin embargo, era posible que la segunda lectura cambiara por unas cuantas unidades de cuadrante. Se hacían aún otros ajustes menores del microcuadrante hasta que el circuito quedara en equilibrio. Se tomaba nota entonces de la lectura del cuadrante.

La orientación de las lecturas quedaba determinada por la dirección del par fijo de ruedas. Se hacían las lecturas en ranuras opuestas de cada par y a profundidades idénticas. Las cuatro ranuras podían referirse según los puntos cardinales N, S, E, W. Fue conveniente considerar al N y E como positivos y al S y W como negativos.

Se efectuó una verificación en el campo para comprobar la corrección de las lecturas. La suma de pares correspondientes de lecturas, a profundidades idénticas, debía ser igual a una constante. Los dos últimos dígitos de la suma de las cifras de las columnas N y S, se escribían en la esquina superior derecha de la columna en S. Esto mismo se hizo en las columnas E y W. La suma de las lecturas para cada

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

profundidad no debía variar más de 2 ó 3 unidades del cuadrante a un lado o al otro del promedio. Si una suma cualquiera caía fuera de ese intervalo era señal de que:

a.- Dos de las ranuras no eran paralelas debido a la distorsión del tubo, a la profundidad irregular de las ranuras, o a que existía algún obstáculo en las ranuras paralelas.

b.- Había un error en la profundidad.

c.- Se presentaba equilibrio impropio del circuito.

d.- El instrumento se encontraba fuera de las ranuras.

e.- El instrumento posiblemente tenía un mal funcionamiento.

De cualquier manera las lecturas debían verificarse si la suma difería en más de 5 unidades de carátula.

Para lecturas debajo de 5 pies de profundidad debía colocarse la ménsula de la polea, la cual debía quitarse al extraer el instrumento para evitar daños.

El instrumento debía revisarse cada vez que se le sacaba del tubo para verificar que todavía rodara correctamente en las ranuras. Si el instrumento no rodaba bien, entonces lo más probable era que una junta había salido de alineamiento. Si esto ocurría, se debía utilizar un juego especial de varillas que aplicaran una torsión para reorientar el instrumento.

3.- Cuando se empleaban juntas telescópicas era esencial que todas las lecturas sucesivas se tomaran en la misma posición relativa en cada tubo de 5 pies, como en las lecturas originales. El mejor procedimiento era primero localizar las juntas con el torpedo de asentamiento, determinando así la profundidad del fondo de cada tubo. Las lecturas subsecuentes del inclinómetro se tomaban a estas profundidades restándoles 1, 2.5 y 4 pies.

Operación del torpedo

El torpedo de asentamiento modelo 79, estaba diseñado para operar dentro de la tubería del inclinómetro utilizando coples de 12 pulgadas.

Estos coples especiales permitían hasta seis pulgadas de acercamiento entre dos tramos consecutivos de tubería. El torpedo medía la distancia desde el fondo de cada

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

tramo de tubo de cinco pies hacia arriba, hasta la boca de observación. La cota de cada tramo de tubo podía calcularse restando la lectura de la cadena de la cota de la parte superior a la tubería. La cota de la boca de la tubería podía determinarse por métodos comunes de nivelación.

Para efectuar las lecturas de asentamiento se recomendó el siguiente equipo:

- a.- Torpedo medidor de asentamiento.
- b.- Cadena o longímetro de topógrafo.
- c.- Escala de un pie para dar la distancia desde la marca de pie entero sobre la cadena hasta la parte alta de la tubería.

La distancia de los brazos del torpedo al cero de la cadena o longímetro era una constante para cada instrumento y cadena. Esa constante debía sumarse a la lectura de la cadena para determinar la profundidad verdadera de cada tramo de tubo.

Para trabar los brazos retráctiles en su posición abierta, se invertía el instrumento y se jalaba hacia abajo la varilla de la tuerca hexagonal de $1\frac{1}{4}$ '' que se localizaba cerca del tope de arriba del instrumento. Antes de invertir el torpedo a su posición normal se dejaba de jalar la tuerca hexagonal. Esta operación trababa los brazos en su posición extendida.

Se sujetaba el torpedo a una cadena de topógrafo y se bajaba al interior del tubo donde las ruedas guía de abajo corrían en las ranuras del tubo hasta el fondo del pozo, las mediciones se hacían desde el fondo de cada tramo de 1.5 m de la tubería hasta la escala en la superficie.

Después de haber obtenido las lecturas con el instrumento podían retraerse los brazos por medio de cualquiera de los siguientes métodos.

- a.- Se bajaba el instrumento varios pies debajo de la junta donde se había tomado la última lectura. Se le daba al instrumento un jalón repentino hacia arriba con el objeto de soltar el contrapeso excéntrico, lo que hacía que se retrajeran los brazos, impulsados por los resortes.
- b.- Los brazos de referencia podían retraerse bajando el torpedo hasta el fondo del pozo y dejando que se golpearan ligeramente con el tapón del fondo.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Si ambos métodos fallaban podía bajarse por el pozo una varilla de $\frac{1}{2}$ " o un tubo, tal que pegaran en la parte superior de la tuerca hexagonal. Cuando se empujaba hacia abajo esta tuerca, se soltaba el contrapeso y se retraían los brazos.

Se recomendó verificar el instrumento periódicamente para asegurar que todas las partes móviles operaran libremente y que la corrosión no atascara los baleros. Los anillos "O" sellaban el interior del instrumento para evitar la humedad.

+ Piezómetros:

Operación del piezómetro

1.- El elemento crucial para la operación de los piezómetros neumáticos lo constituía la "consola" de medición de las presiones. Era un dispositivo hecho a base de un tanque de aire a presión, el cual se inyectaba al piezómetro y se recibía por otro lado en el burbujeador.

Para un número determinado de burbujas por segundo se tenían las presiones equivalentes, las cuales eran medidas en los manómetros correspondientes.

La consola de medición de presiones debía calibrarse previamente en el laboratorio para dar la seguridad de que las mediciones efectuadas eran correctas. Lo mismo se debía examinar cuidadosamente para evitar que se presentaran fugas de aire, este aspecto fue muy importante de realizar porque cuando se presentaban fugas, por muy pequeñas que estas fueran, se entorpecía la determinación de las lecturas, con lo cual se perdía mucho tiempo y se cometían errores.

2.- Una vez que se tenía en condiciones de operación a la consola, se podía proceder a la medición de las presiones de poro que se desarrollaban en el suelo. Para tal efecto se hacía la conexión de la tubería de entrada al piezómetro con la tubería que conducía a los manómetros, mientras que la otra terminal permanecía dentro del depósito burbujeador. Se abría la llave correspondiente a la presión del piezómetro y se le controlaba lentamente para irlo aumentando hasta llegar a la obtención de la primera burbuja en el recipiente de plástico. Con la llave de aguja que era la de mayor precisión se lograba el control cuidadoso del paso del aire para

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

establecer el número de burbujas por segundo requeridas por la calibración existente en el piezómetro.

Para un mejor control de la presión aplicada al piezómetro se debían utilizar las dos llaves para el control de la inyección del aire a presión en el piezómetro, es decir, primero se abría la llave de paso hasta que apareciera la primera burbuja, se cerraba ésta y luego se abría la llave de aguja y se inyectaba aire muy lentamente de acuerdo con la respuesta que se obtuviera con la velocidad del burbujeo. Las lecturas del número de burbujas por cada segundo se debían hacer constantemente hasta lograr que el ritmo se estabilizara en la frecuencia previamente determinada por la calibración, en ese preciso instante se debía hacer la lectura de la presión en el manómetro correspondiente. En un principio era conveniente hacer dos determinaciones en cada piezómetro, es decir, después de la primera lectura se abatía la presión hasta anularla, y luego se volvía a elevar hasta obtener una segunda lectura. Con base en esa experiencia se podía estar en aptitud de elegir el procedimiento más conveniente para las lecturas subsiguientes.

Debido a que se tenían dos manómetros de diferente capacidad en la “consola”, se requería que fueran utilizados de acuerdo con las presiones encontradas en cada uno de los piezómetros. Así, las altas presiones de poro requerían lecturas en el manómetro de alta capacidad y las bajas se debían registrar con el otro tipo de manómetro.

3.- Fue conveniente que la “consola” se sometiera a una serie de calibraciones frecuentes con el objeto de observar su comportamiento durante el tiempo en que se iba a operar. Para llevar a cabo estas calibraciones se utilizaban aquellos periodos en que no se requería hacer lecturas de una manera apremiante.

Calibración de piezómetros

1.- Antes de instalar los piezómetros, se les hacía una calibración en el laboratorio y además se determinaba su buen funcionamiento. Una vez calibrados ya no se debían desarmar y se procedía a su instalación.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

2.- La cámara inferior del piezómetro se debía llenar completamente por medio de arena. Para ello se quitaba el tapón y se introducía la arena hasta que estuviera en contacto con la piedra porosa.

3.- Tanto la unión del tubo de PVC de 1 ½” con la parte superior del piezómetro como también las partes de la tubería mencionada, debían estar debidamente selladas.

4.- La unidad del piezómetro al ser instalada dentro de la perforación debía quedar bien graduada. En la parte inferior había un espacio aproximado de 60 cm. La arena abarcaba aproximadamente 30 cm del extremo superior de la caja del piezómetro.

5.- El sello del piezómetro se efectuaba por medio de bentonita. Su altura sería de 0.40 m en todos los piezómetros. Se procedía a su colocación vaciándola cuidadosamente desde la superficie hasta lograr la altura antes señalada.

6.- Posteriormente se continuaba el relleno con material del mismo terreno, colocándolo a partir del nivel superior del sello de bentonita. El vaciado de este material se hacía en la misma forma especificada para la arena y la bentonita. El material era arcilla del subsuelo.

7.- En aquellos puntos en que se señaló la instalación de dos o tres piezómetros a diferentes profundidades, las perforaciones se hacían en forma separada, debiendo dejar una distancia de un metro entre perforaciones y estar contenidas éstas en un plano transversal. Cada perforación se hacía hasta que había sido tapada la perforación vecina colocada a un metro de distancia, con ello se pretendía evitar que se manifestaran influencias nocivas probables de una línea a otra. A fin de que el avance de perforación no se interrumpiera debía proseguirse con otros puntos de instalación que se encontraran más alejados.

Instalación de piezómetros

1.- Si la instalación de los piezómetros se hacía cuando todavía se construía el cuerpo del terraplén, entonces se debía proteger la tubería de salida a cada piezómetro, principalmente cuando se debía elevar la rasante a un punto definitivo.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Para tal efecto se iba acumulando material del mismo tipo del terraplén alrededor de la tubería, a fin de que en lo posible se conserva verticalmente, de esa manera se iban formando montones de material en la base de los tubos que se conservaban levantados todo el tiempo que se requería para ir construyendo el terraplén, similar a lo que ocurría con la instalación de la tubería para inclinómetros (**Imagen 12-d**). También se podía recurrir al procedimiento de hincar estacones o tubos rígidos que sirvieran de apoyo a la tubería de plástico de los piezómetros, los cuales se podían ir desplazando hacia arriba a medida que avanzara la construcción del terraplén.

2.- Una vez que se tenía la tubería de plástico en la superficie del terraplén, era necesario colocar un codo de 90° a fin de poder tender la línea lateralmente hasta colocarla en un lugar seguro, libre de interrupciones y en donde podían efectuarse las lecturas cómodamente y de manera que la “consola” de medición quedara bien ubicada. Se protegía la tubería colocándola dentro de una zanja lateral de 15 cm de profundidad de manera que quedara un colchón encima de ella, hecho con el mismo material del que estaba formado el terraplén. Todo el tiempo se tuvo el cuidado necesario para que la tubería de plástico de los piezómetros permaneciera en su lugar, evitando que se desplazara dentro del tubo mayor en el cual se encontraba alojada, pues se corría el riesgo de que los tubos interiores se deslizaran sin que se pudieran rescatar. En el caso de los piezómetros ubicados a los lados de la línea principal, se podían hacer mediciones en el mismo lugar donde se localizaba la boca del terreno, evitando con ello el tener que trasladar las tuberías a las partes laterales del terraplén.

3.- Las tuberías de plástico de los piezómetros se conectaban a las tuberías de la “consola” cada vez que se iba a efectuar la lectura de la presión de poro. Esa conexión debía garantizar que el aire no escapara de las tuberías, por lo que se hacía con mucho cuidado y se empleaban conectores de la mejor calidad y que fueran adecuados para utilizarse en ese caso. La conexión se podía efectuar por medio de dos tuercas unión tipo cónico que se sujetaban a los dos extremos de las tuberías y un conector unión macho era colocado en la parte intermedia. Este

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

constituía uno de los medios más sencillos y eficientes que podían contribuir para que no se presentaran fugas de aire. Esto se empleaba principalmente en la tubería de $\frac{1}{4}$ " de diámetro.

Si las tuberías del piezómetro no eran de dimensiones estándar y no existían en el mercado las conexiones señaladas, entonces se podrían seleccionar aquellas que permitieran una combinación que fuera la que más se asemejara a la descrita con anterioridad. De cualquier manera esta elección debía estar sujeta a un cuidado especial, y podía recurrirse inclusive a experimentar previamente con un determinado juego de conexiones, lo que permitía una mayor seguridad al hacer las lecturas en la "consola".

DE MEDICIONES EN TERRAPLENES DE PRUEBA

<p>Imagen 13. Ejemplo de banco de nivel profundo.</p>	<p>Imagen 14. Piezómetro</p>
<p>Figura 10 del artículo "Instrumentación geotécnica de una autopista en suelos blandos", SMIG.</p>	<p>Figura 3 del artículo "La instrumentación geotécnica: apoyo fundamental del desarrollo tecnológico", Revista Geotecnia No. 239.</p>

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco



Imagen 15. Ejemplo de carcasa para inclinómetro con ranuras mecanizadas y detalle de conexión.

Figura 3 de publicación "Transportation Research Circular Number E-C129" de la Transportation Research Board of The National Academies.

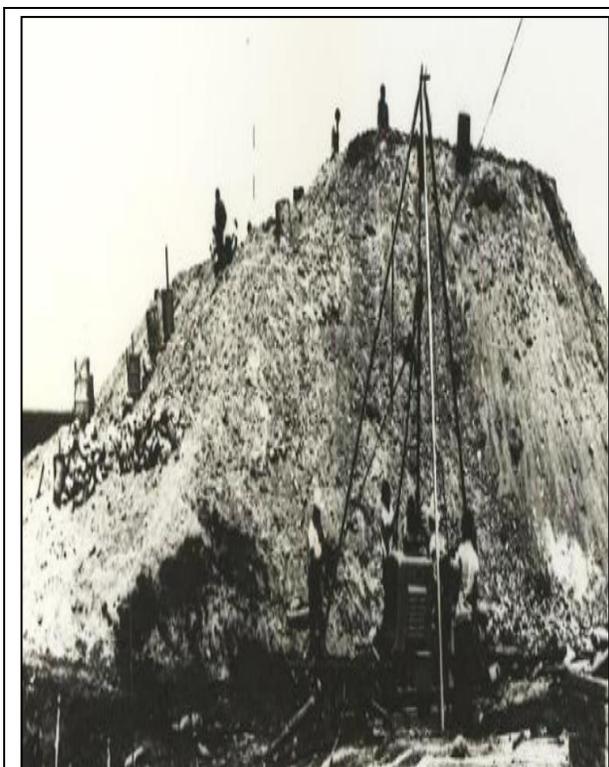


Imagen 16. Instrumentación y monitoreo de terraplén de prueba llevado a la falla.

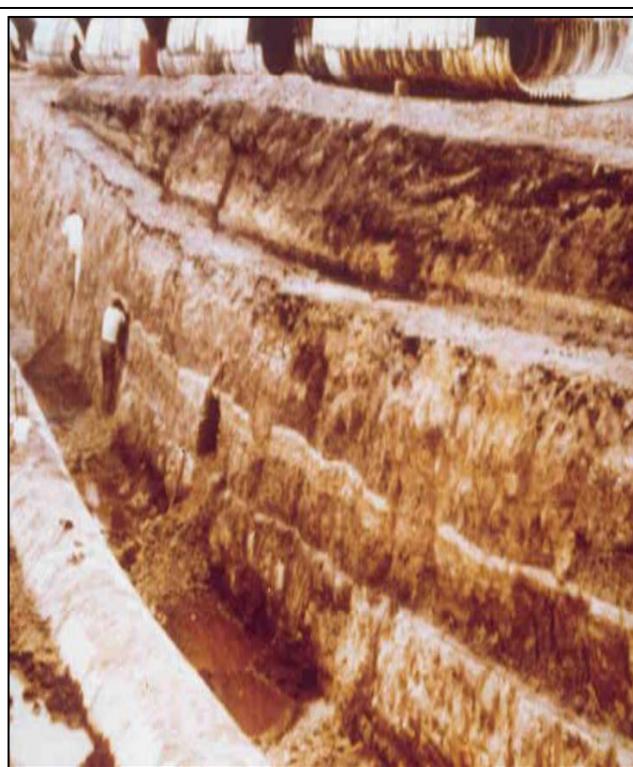


Imagen 17. Monitoreo de terraplenes.

Imágenes de la presentación "Algunas experiencias geotécnicas en el suelo del Lago de Texcoco", a cargo del M.I. Gabriel Moreno Pecero, Grupo 2030 del Colegio de Ingenieros Civiles de México.

4. Primeros resultados obtenidos

1.- Nivelaciones. Se habían efectuado siete diferentes nivelaciones en el tramo de prueba del material pesado y seis en el tramo de prueba que representaba la condición de material ligero. Las últimas en cada caso correspondieron a fechas posteriores a la terminación de la construcción de los terraplenes, las restantes fueron realizadas durante la etapa de construcción (**Tabla 4 y Tabla 5**).

Los resultados obtenidos de la totalidad de las nivelaciones efectuadas se representaron en gráficas de curvas de hundimientos (**Anexo 16 y Anexo 17**) correspondientes al periodo comprendido entre cada nivelación sucesiva. Del análisis de dichos datos se desprendieron las conclusiones que a continuación se indican.

Tabla 4. Registro de asentamientos en terraplén de sección pesada.

SECCIÓN PESADA								
LAPSO		ASENTAMIENTOS (mm)						Altura del terraplén sobre la superficie del terreno.-
		Cuerpo del terraplén				Bermas		
1965	Duración	Máx. Tot.	Máx. Día.	Medio Tot.	Medio Día.	Medio Tot.	Medio Día.	
19 de noviembre	11 días	100	9	70	6	60	5.5	1.60
30 de noviembre								
30 de noviembre	7 días	90	13	70	10	40	6	2.20
07 de diciembre								
07 de diciembre	9 días	240	37	160	18	40	4.5	2.80
16 de diciembre								
16 de diciembre	9 días	220	37	140	23	40	6	3.00
22 de diciembre								
1966	Duración							
22 de diciembre	24 días	180	7.5	120	5	40	2	Fin de la construcción. Sección completa.
15 de enero								
15 de enero	11 días	60	5.5	50	4.5	30	3	
26 de enero								
26 de enero	8 días	37	4.5	30	4	15	2	
3 de febrero								
3 de febrero	11 días	57	5	45	4	30	3	
14 de febrero								

Tabla 5. Registro de asentamientos en terraplén de sección ligera.

SECCIÓN LIGERA (km 4+063)								
LAPSO		ASENTAMIENTOS (mm)						Altura del terraplén sobre la superficie del terreno.-
		Cuerpo del terraplén				Hombros		
1965	Duración	Máx. Tot.	Máx. Día.	Medio Tot.	Medio Día.	Medio Tot.	Medio Día.	
11 de noviembre	15 días	80	5	60	4	30	2	1.70
26 de noviembre								
26 de noviembre	13 días	140	11	100	8	60	5	2.20
09 de diciembre								
09 de diciembre	12 días	280	23	200	17	80	7	2.50
21 de diciembre								
1966	Duración							
21 de diciembre	25 días	140	6	100	4	60	2.5	Fin de la construcción. Sección completa.
15 de enero								
15 de enero	11 días	40	4	30	3	10	1	
26 de enero								
26 de enero	8 días	38	4.5	30	3.5	14	1.5	
3 de febrero								
3 de febrero	11 días	30	3	25	2	15	1.5	
14 de febrero								

En el lapso medido durante la construcción, el asentamiento máximo en la sección pesada fue de 65 cm y en la sección ligera de 50 cm. Desde el momento en que se terminó la construcción hasta la fecha de la última nivelación, ambas cifras fueron de 34 y 25 cm respectivamente. Como era de preverse la tendencia fue a un hundimiento notablemente mayor en la sección pesada, aunque a esas alturas se estimó que el periodo de observación era todavía insuficiente para obtener conclusiones de carácter definitivo.

RESULTADOS EN EL TIEMPO

Debido a la instrumentación realizada tanto de los terraplenes como del su suelo de apoyo, con bancos de nivel, piezómetros e inclinómetros, al menos uno de los terraplenes de prueba pudo monitorearse durante 16 años y el resultado obtenido fue que la magnitud de los hundimientos del terreno natural por la presencia de los

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

terraplenes fue menor a la calculada según las teorías tradicionales, es decir, los resultados reales se alejaron de los teóricos. Esto pudo ponerse de manifiesto gracias a la instrumentación y, con ello se condujo a investigar la causa de esa diferencia y además, a generar otra teoría para la determinación de la magnitud y la rapidez del hundimiento. Se demostró otra función de la instrumentación, que fue calibrar teorías; si se encuentra que la teoría se aproxima a lo que acontece realmente, se fortalece la confianza en la aplicación de la teoría utilizada para futuros casos similares, permitiendo también disminuir el factor de seguridad y en consecuencia lograr una obra más económica, por lo tanto, gracias a la instrumentación se pudo tener un avance. Pero si esos resultados no se aproximan a lo teórico, se requiere generar una nueva teoría, con lo cual se avanzaría tecnológicamente.

5. Conclusiones

- Es importante la preservación de documentos y experiencias que han surgido históricamente a partir del ejercicio de la ingeniería, en este caso la ingeniería civil mexicana, con el fin de contribuir a enriquecer procesos educativos, de investigación y prácticos. Con la digitalización de la información, de lo acontecido en el caso referido es este documento, se garantiza su seguridad, categorización y fácil acceso gracias a los mecanismos de resguardo y consulta que ofrece la Universidad Nacional Autónoma de México.
- El realizar estudios adecuados, en este caso del comportamiento del suelo, nos permitir establecer las condiciones bajo las cuales se puede presentar la interacción de las obras o estructuras a desarrollar y qué se requiere para que éstas sean eficientes, económicas y seguras, o en todo caso determinar qué alternativas son descartables.
- En este proceso de exploración y conocimiento del suelo y en consecuencia del comportamiento de los terraplenes construidos en él, además de las diferentes pruebas de laboratorio, la instrumentación jugó un papel trascendente al permitir conocer las condiciones iniciales, durante su construcción e incluso posteriores a su terminación, lo que aunado a la experiencia de los ingenieros a cargo del proyecto, condujo a la determinación de los parámetros de diseño para el camino en esa zona.
- Una cualidad importante que debemos desarrollar los ingenieros y posiblemente cualquier profesional, es la de ser empíricos, esto en el sentido de tener la capacidad de aprovechar el conocimiento o información emanados de otras experiencias y sumarlo a lo que nos dicte nuestra propia observación. Ejemplo de ello fue la utilización de la información generada por la Comisión Federal de Electricidad y la misma SOP para la realización de proyectos en el Lago, lo cual no significa la solución automática del problema que se enfrenta, pero pueden servir como hilo conductor para encontrar soluciones adecuadas de forma eficiente. Recordar que extrapolar soluciones es peligroso.

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

- Habrá proyectos en los que por su magnitud o trascendencia se justifique la ejecución de modelos a escala real, que si bien implican mayores costos, como fue el caso de los terraplenes de prueba, también es cierto que permiten dar mayor certeza sobre el camino a seguir y conocer experimentalmente la confiabilidad de las teorías de las que se dispone, en este caso fueron de la Mecánica de Suelos. Con esta forma de proceder pueden fortalecerse las teorías consideradas o bien, se puede revelar qué adecuaciones o mejoras de ellas resultan pertinentes.
- Los estudios realizados permitieron conocer el comportamiento que se podía esperar del suelo, a partir de la colocación o construcción de los terraplenes. Con ello se dio pie a elegir los mejores materiales disponibles para éstos y sus características geométricas. Además de conocer propiedades del suelo, se dilucidó qué comportamiento podía presentar la estructura (terraplenes) en sí, durante y después de la construcción.
- Es importante que al determinar los sitios que pueden fungir como nuestros bancos de materiales, esto no se haga pensando sólo en obtener el material que satisfaga los requerimientos técnicos de nuestro proyecto, hay que considerar cómo puede impactar la explotación de estos bancos a las comunidades cercanas y los cambios que podría significar para el medio ambiente.
- En el caso de la instrumentación empleada se concluye que no sólo es importante identificar los elementos más adecuados para las mediciones que se pretende realizar, sino que además deben contemplarse factores ambientales que pueden incidir en su funcionamiento y en consecuencia en la confiabilidad de los resultados obtenidos. Como es el caso de los instrumentos empleados en el ex Lago de Texcoco, en donde su funcionamiento podía resultar afectado por la salinidad del agua del lago. Se da por hecho que el personal encargado de la manipulación del equipo de instrumentación está capacitado para ello, pero no debe perderse de vista que el factor humano

Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

también juega un papel importante en el mejor aprovechamiento de la instrumentación.

- Sin afán de ser redundante pero cerrando algunas de las conclusiones anteriores, considero que la instrumentación es un mecanismo que permite controlar procedimientos de construcción y a su vez puede contribuir en la generación de nuevas teorías, con lo cual se puede avanzar en el desarrollo tecnológico.
- La evolución tecnológica puede facilitar la labor ingenieril, pero siempre será necesario contar con las bases que nos permitan identificar cuando un resultado es o no razonable.
- Como parte de corroborar la información contenida en el documento original sobre el “Camino Peñón-Texcoco”, se ejecutó con los mismos datos el Método Sueco, obteniéndose un F.S. = 1.45, menor al considerado en su momento, que fue de 1.47. De ello se concluye que más allá de las teorías empleadas, y de la tecnología con la que se cuente para ello, es importante emplearlas adecuadamente.
- Si bien se carecía de información suficiente sobre la construcción en suelos críticos como el de Texcoco, hubo teorías que permitieron suponer o predecir cierto comportamiento, sin embargo, pienso que esta experiencia también es ejemplo de la importancia que tuvo el ingenio por parte del personal de la SOP encargado del proyecto. El ingenio es una capacidad que debe acompañarnos en la diversidad de actividades que desempeñemos como ingenieros.
- La innovación va más allá de crear algo nuevo, también puede entenderse como la capacidad de adaptar en nuestras actividades cosas ya probadas o desarrolladas, no quedarnos con lo que conocemos o creemos dominar, todo es perfectible.

Anexo 1.

SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS

DIRECCIÓN GENERAL DE PROYECTOS Y LABORATORIOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SUELOS
OFICINA DE MECÁNICA DE SUELOS

CÍRCULOS DE MOHR: COMPRESIÓN TRIAXIAL

RÁPIDA (UU)

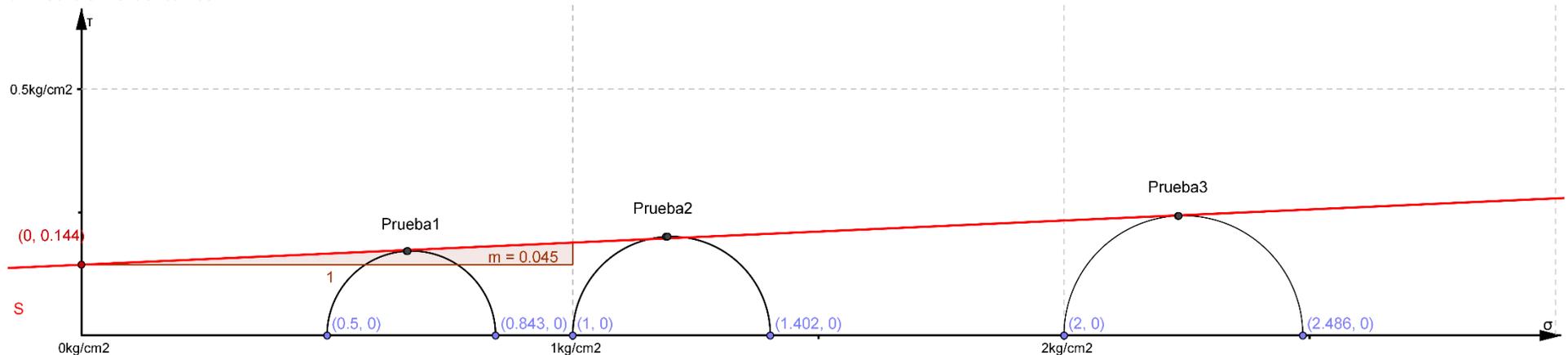
CONSOLIDADA-RÁPIDA (CU)

LENTA (CD)

prueba	w _i	w _f	e _i	e _f	G _i	G _f	σ _{III}	σ _I = σ _{II}	γ	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE
No.	%	%			%	%	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ³	
1	3.67		8.05		100		0.5	0.343	1.155	φ = 2.8° c = 0.15 $\frac{kg}{cm^2}$
2	3.66		8.20		100		1.0	0.402	1.130	
3	3.60		7.90		100		2.0	0.486	1.185	
4										
5										
6										

OBRA: Camino Peñón- Texcoco
 CAMINO: Camino Peñón- Texcoco
 TRAMO: Est. 3+300=2+863.00
 LOCALIZACIÓN: 60m lza. ORIGEN: El Peñón D.F.
 SONDEO No. 4 ENSAYE No. 1142-B
 MUESTRA No. 11 PROF. 9.30 a 9.48 m
 DESCRIPCIÓN: Arcilla gris verdosa de alta plasticidad (CH)
 FECHA DEL ENSAYO: 27 de septiembre de 1965
 OPERADOR: B.G.B
 CALCULÓ: G.B.F. FECHA 29 de septiembre de 1965

σ = esfuerzo axial
τ = esfuerzo cortante



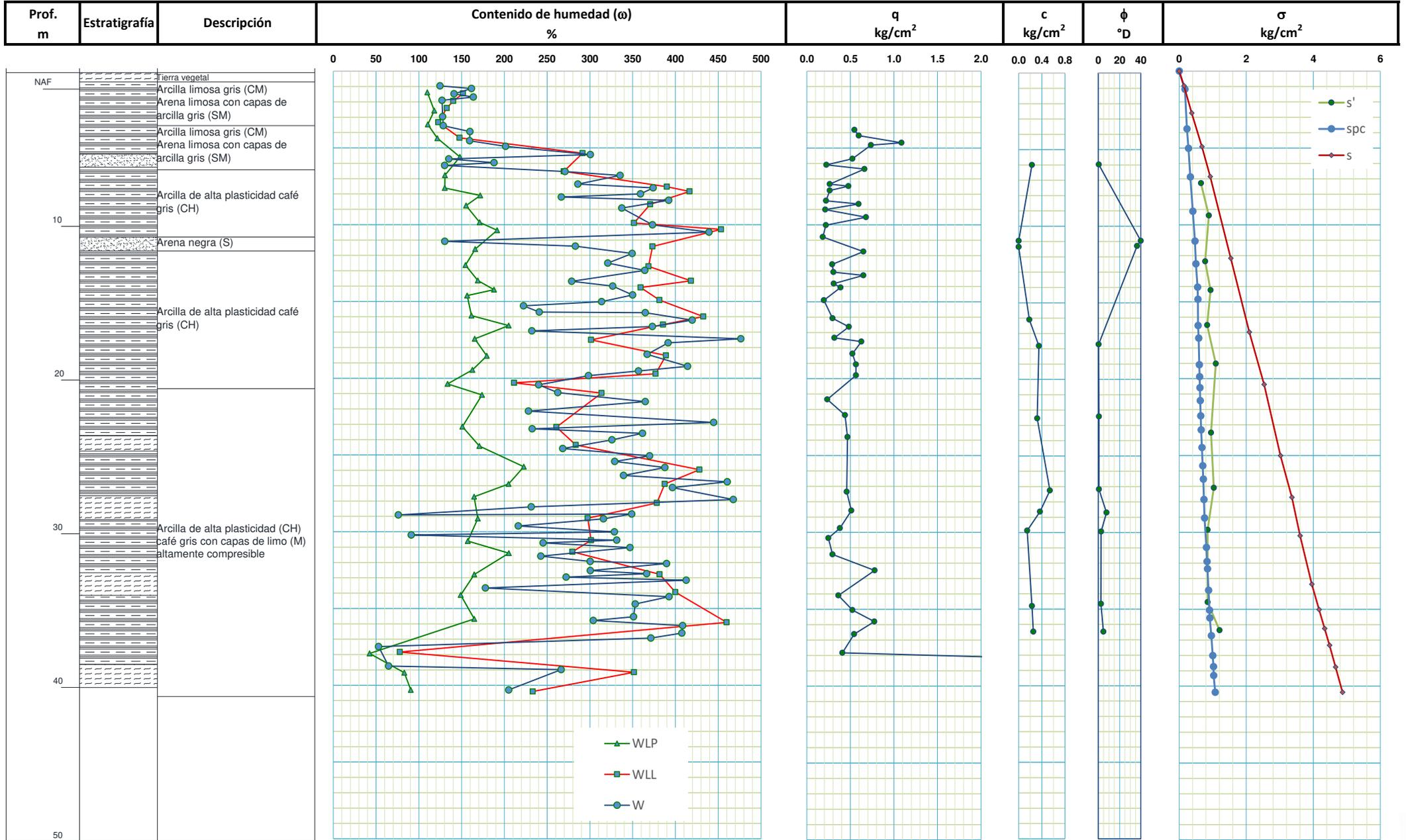
$s = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$

CAMINO: PEÑÓN-TEXCOCO

Sondeo No. I

Ubicación. Camino: Peñón-Texcoco, km: 1+800 a 60 m Izq. = 1+063 con origen en Unidad Aragón a 60m izq. del CL

Fecha: 12 de mayo de 1965



- | | | |
|-------------|-----------|-------|
| Arcilla (C) | Arena (S) | Roca |
| Limo (M) | Graba (G) | Boleo |

CAMINO: PEÑÓN-TEXCOCO

Sondeo No. V

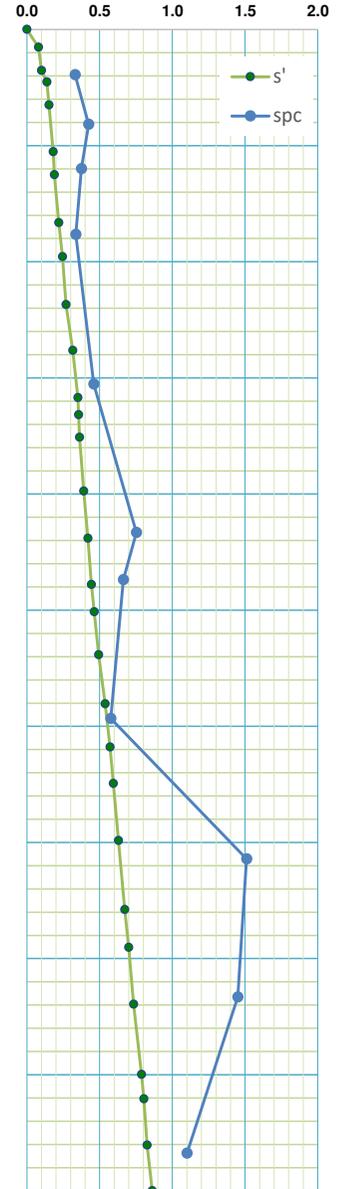
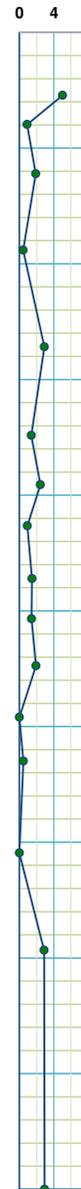
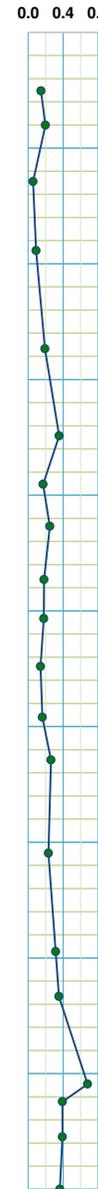
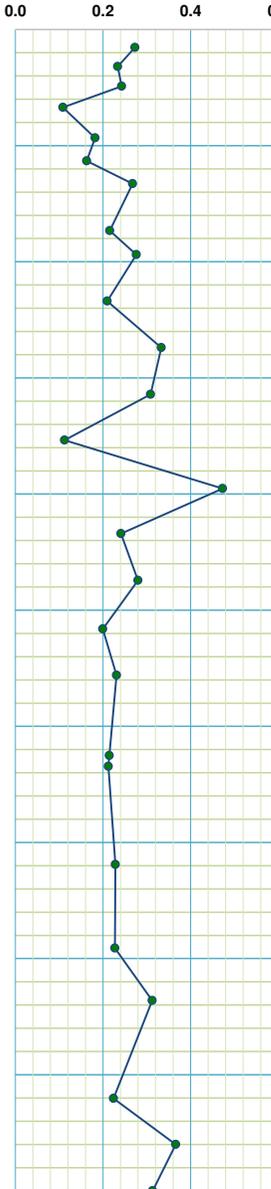
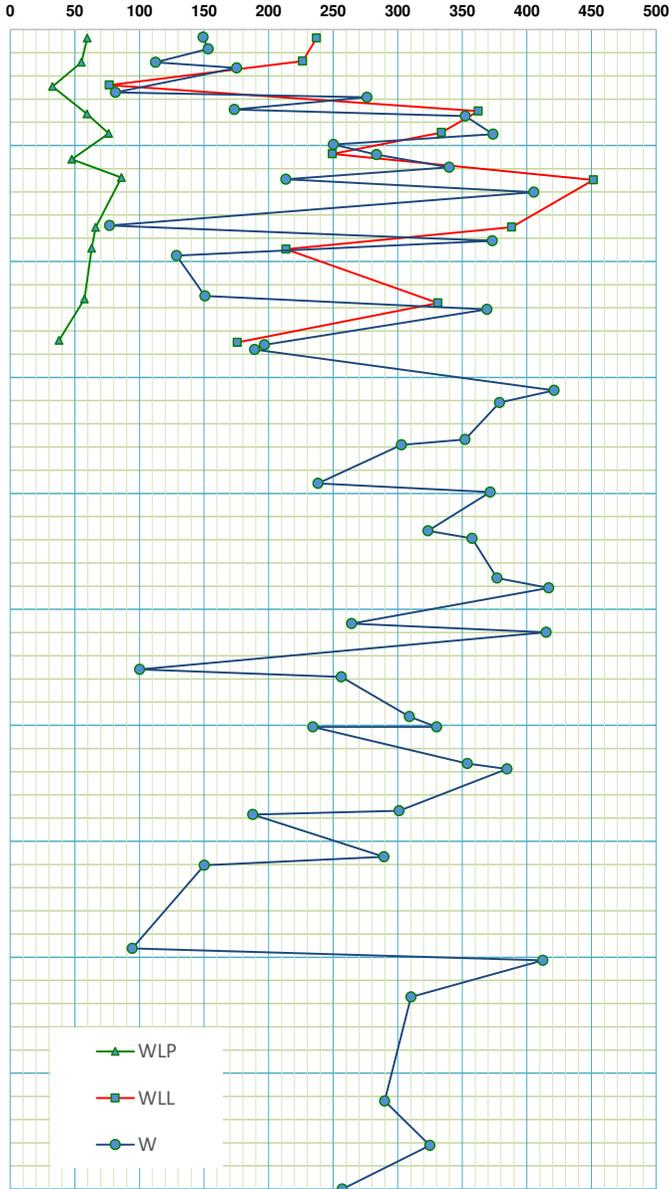
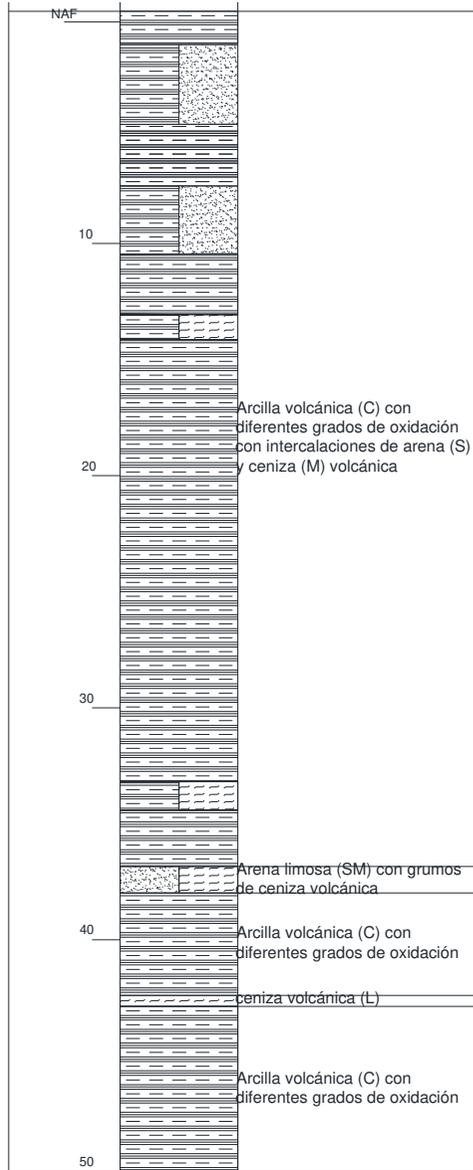
Ubicación. Camino:

Peñón-Tezcoco, km 4+800 = 4+063.60 con origen en Unidad Aragón a 6.0m del CL

Fecha:

12 de mayo de 1965

Prof. m	Estratigrafía	Descripción	Contenido de humedad (ω) %	q kg/cm ²	c kg/cm ²	ϕ °D	σ kg/cm ²
---------	---------------	-------------	-------------------------------------	------------------------	------------------------	-----------	-----------------------------



- | | | |
|-------------|-----------|-------|
| Arcilla (C) | Arena (S) | Roca |
| Limo (M) | Graba (G) | Boleo |

ω = Contenido de humedad
 ω_{lp} = Límite Plástico
 ω_{ll} = Límite Líquido

σ = Esfuerzos Totales
 σ' = Esfuerzos Efectivo
 σ_{pc} = Carga de preconsolidación

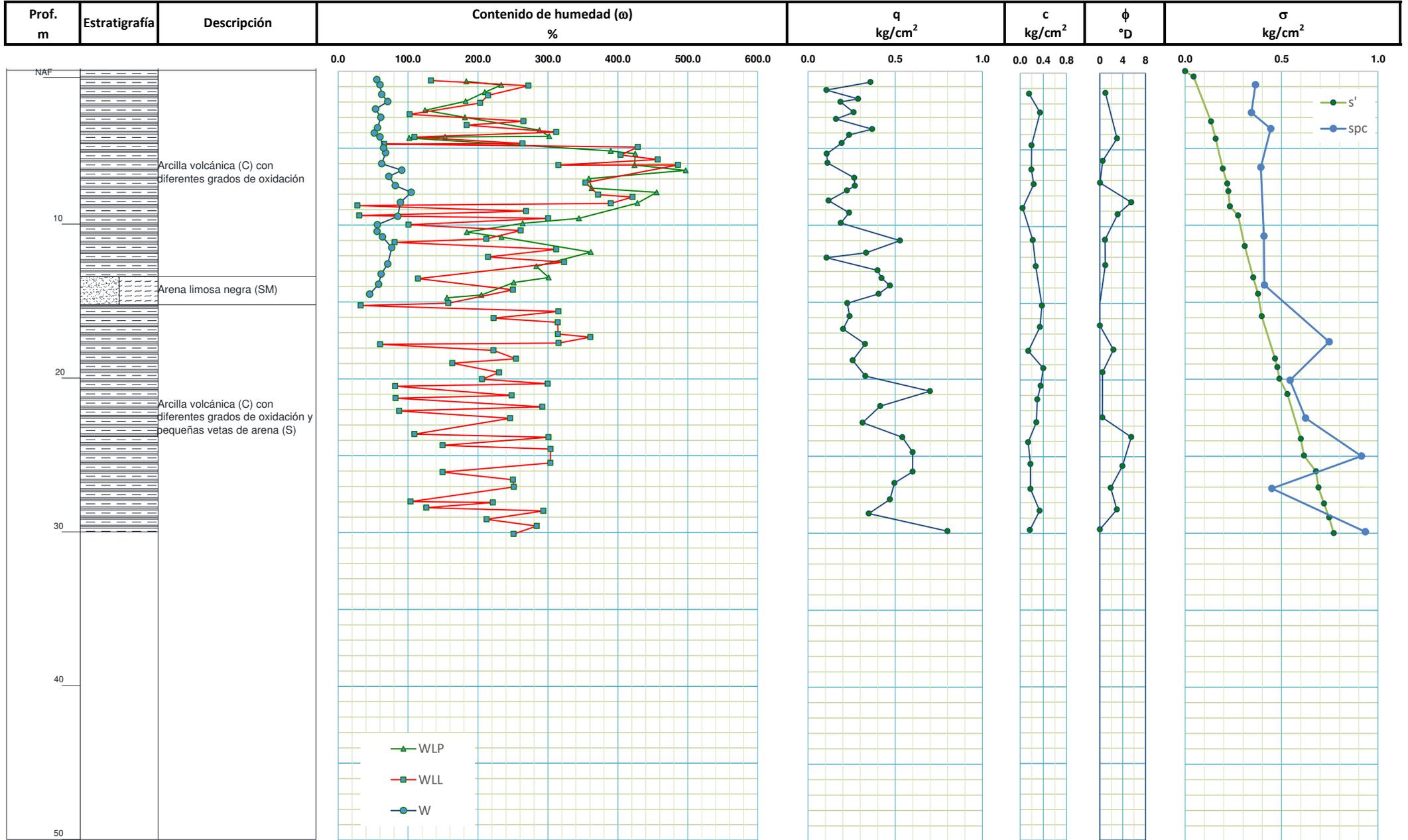
CAMINO: PEÑÓN-TEXCOCO

Sondeo No. VIII-A

Ubicación. Camino: Peñón-Tezcoco, km 7+500 = 6+763.60 con origen en Unidad Aragón a 20m der. del CL

Fecha: 29 de Junio de 1965

29 de Junio de 1965



- | | | |
|-------------|-----------|-------|
| Arcilla (C) | Arena (S) | Roca |
| Limo (M) | Graba (G) | Boleo |

ω = Contenido de humedad
 ω_{lp} = Límite Plástico
 ω_{ll} = Límite Líquido

σ = Esfuerzos Totales
 σ' = Esfuerzos Efectivo
 σ_{pc} = Carga de preconsolidación

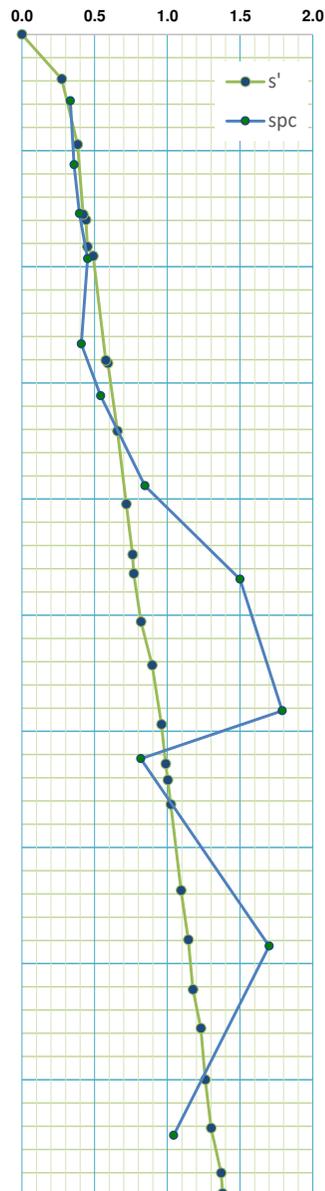
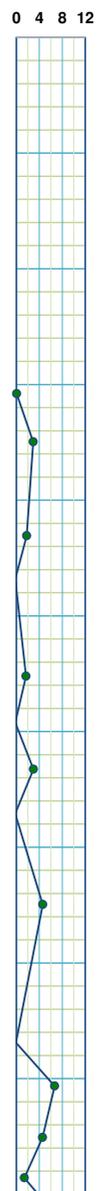
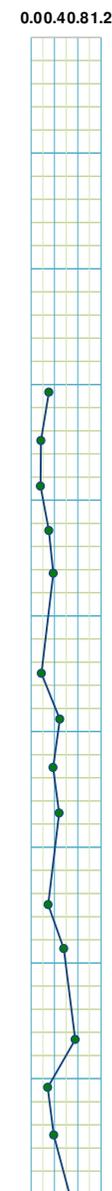
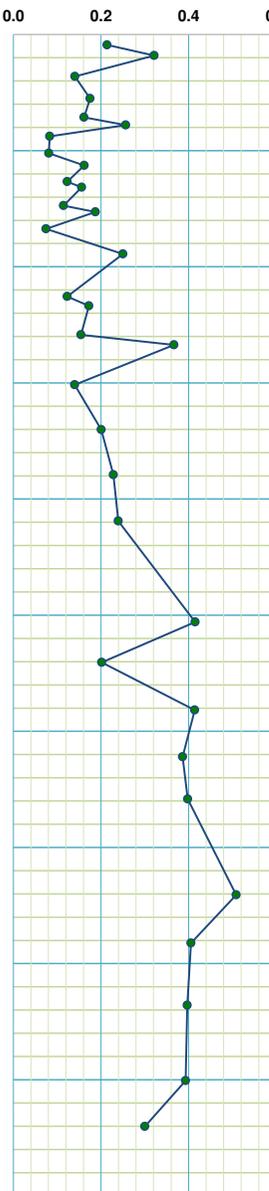
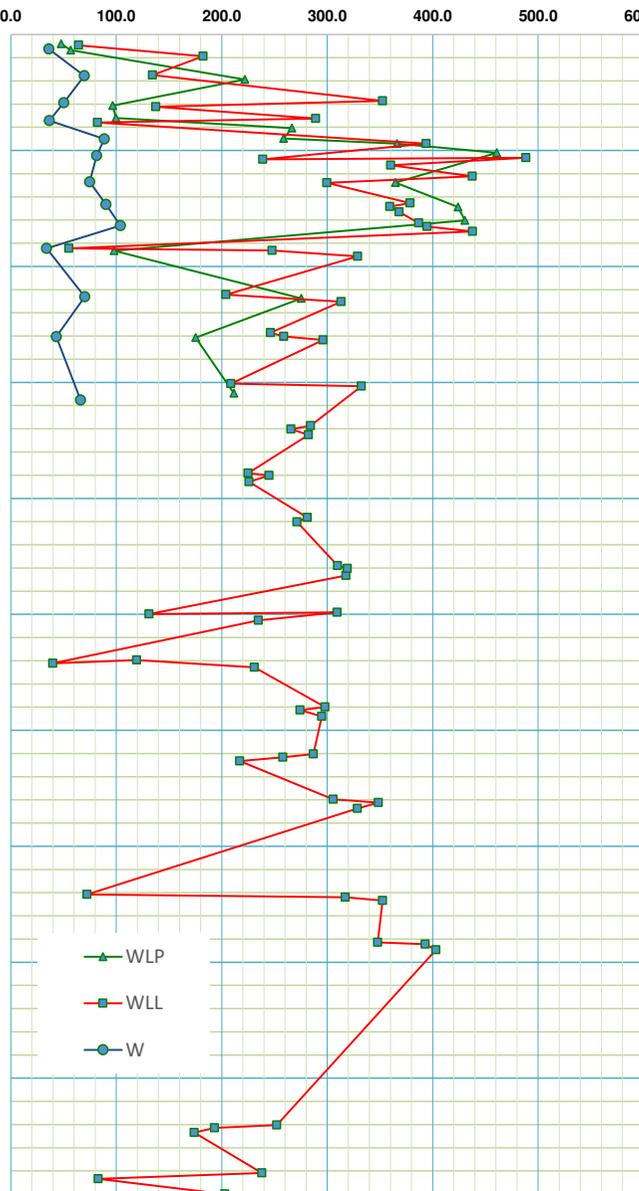
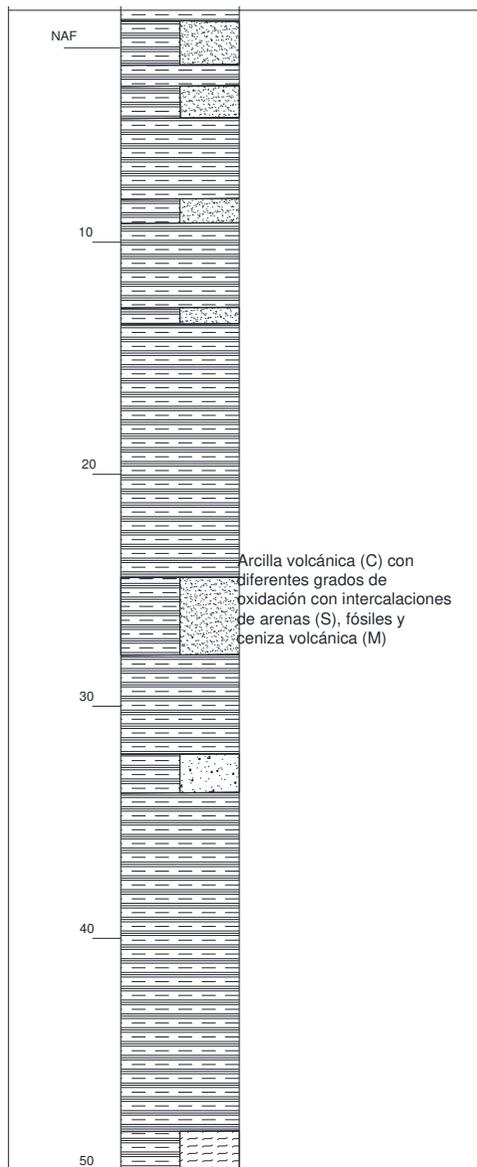
CAMINO: PEÑÓN-TEXCOCO

Sondeo No. IX

Ubicación. Camino: Peñón-Tezcoco, 8+000 = 8+263.60 con origen en Unidad Aragón a 5.6m der. del CL

Fecha: 25 de mayo de 1965

Prof. m	Estratigrafía	Descripción	Contenido de humedad (ω) %	q kg/cm ²	c kg/cm ²	ϕ °D	σ kg/cm ²
---------	---------------	-------------	-------------------------------------	------------------------	------------------------	-----------	-----------------------------



- Arcilla (C)
- Arena (S)
- Roca
- Limo (M)
- Graba (G)
- Boleo

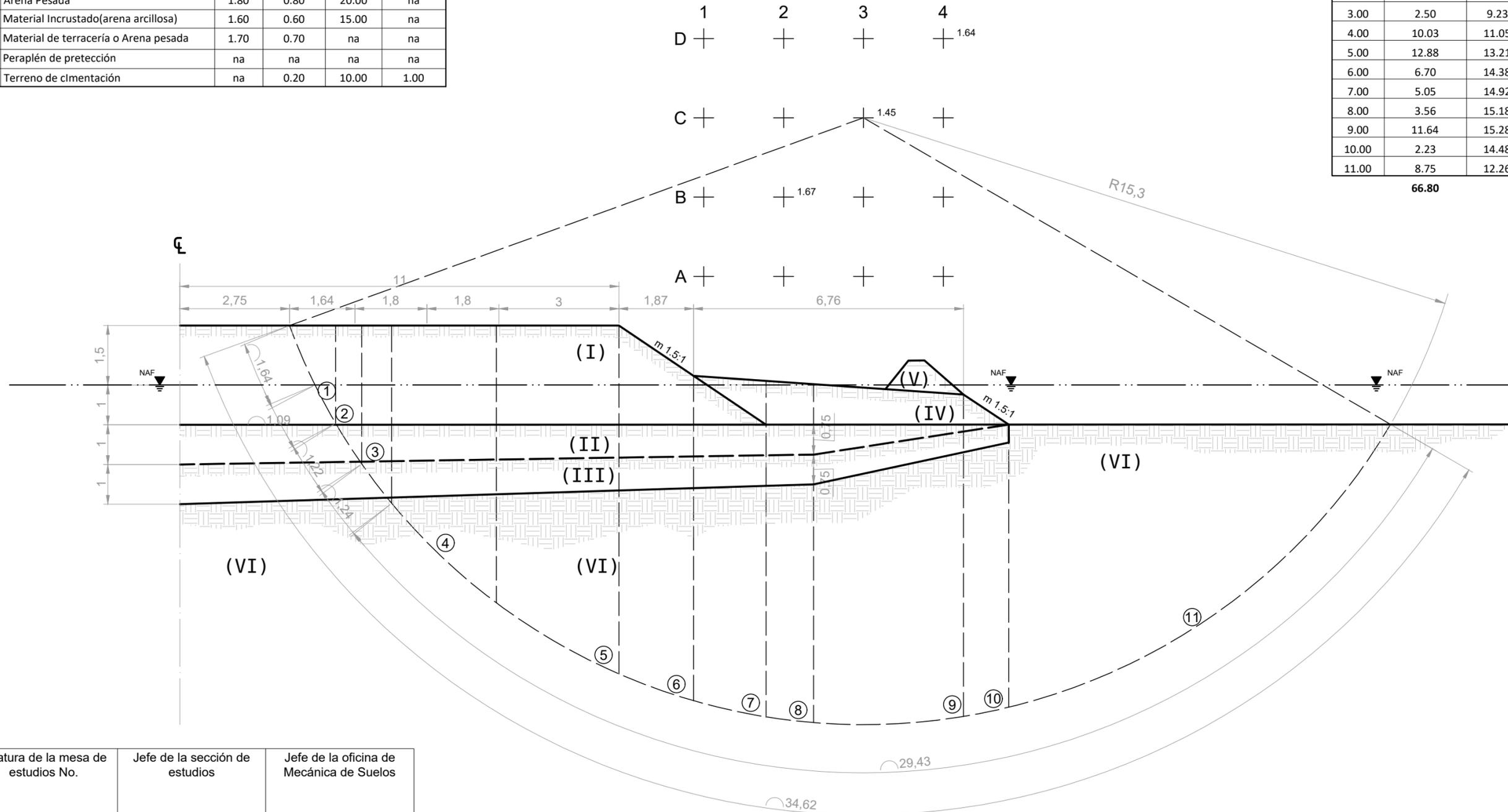
ω = Contenido de humedad
 ω_{lp} = Límite Plástico
 ω_{ll} = Límite Líquido

σ = Esfuerzos Totales
 σ' = Esfuerzos Efectivo
 σ_{pc} = Carga de preconsolidación

ID	Material	γ_d	γ'	ϕ'	c'
		ton/cm ³	ton/cm ³	°D	ton/cm ²
I	Tezontle	1.30	0.30	35.00	na
II	Arena Pesada	1.80	0.80	20.00	na
III	Material Incrustado(arena arcillosa)	1.60	0.60	15.00	na
IV	Material de terracería o Arena pesada	1.70	0.70	na	na
V	Peraplén de pretección	na	na	na	na
VI	Terreno de cimentación	na	0.20	10.00	1.00

Anexo 6.

Dovela	W_i	γ_i	$W_i \cdot \gamma_i$	$\tan(\phi')$	$W_i \cdot \gamma_i \cdot \tan(\phi')$	b	$W_i \cdot b$
	ton	m	ton*m	1.00	ton*m	m	ton*m
1.00	1.74	7.22	12.58	0.7002	8.81	13.62	23.73
2.00	1.73	8.21	14.16	0.3640	5.15	12.88	22.22
3.00	2.50	9.23	23.11	0.2679	6.19	12.18	30.50
4.00	10.03	11.05	110.82	0.1763	19.54	10.41	104.40
5.00	12.88	13.21	170.16	0.1763	30.00	7.61	98.02
6.00	6.70	14.38	96.29	0.1763	16.98	5.20	34.82
7.00	5.05	14.92	75.29	0.1763	13.28	3.34	16.85
8.00	3.56	15.18	54.01	0.1763	9.52	1.85	6.58
9.00	11.64	15.28	177.84	0.1763	31.36	-0.63	-7.33
10.00	2.23	14.48	32.22	0.1763	5.68	-3.06	-6.81
11.00	8.75	12.26	107.32	0.1763	18.92	-7.24	-63.38
	66.80				165.44		259.60



c'_{vi}	Long.	R	$c' \cdot L \cdot R$
ton/m	m	m	ton*m
1.00	29.43	15.30	450.28

P_i	a	$P_i \cdot a$
ton	m	ton*m
5.00	9.13	45.65
5.00	10.93	54.65
5.00	12.73	63.65
		163.95

$W_i \cdot \gamma_i \cdot \tan(\phi') = 165.44 \text{ ton*m}$
 $C' \cdot L \cdot R = 450.28 \text{ ton*m}$
MR 615.72 ton*m

$W_i \cdot b = 259.60 \text{ ton*m}$
 $P_i \cdot a = 163.95 \text{ ton*m}$
MA 423.55 ton*m

Fs = MR/MA = 1.45

Jefatura de la mesa de estudios No.	Jefe de la sección de estudios	Jefe de la oficina de Mecánica de Suelos
	Ing. G. Moreno Pecero	M. en I. Aguire Menchaca

Camino: Directo Peñón - Texcoco
 Tramo: El mismo
 km: 3 + 750.00
 Origen: Unidad Aragón, D. F.



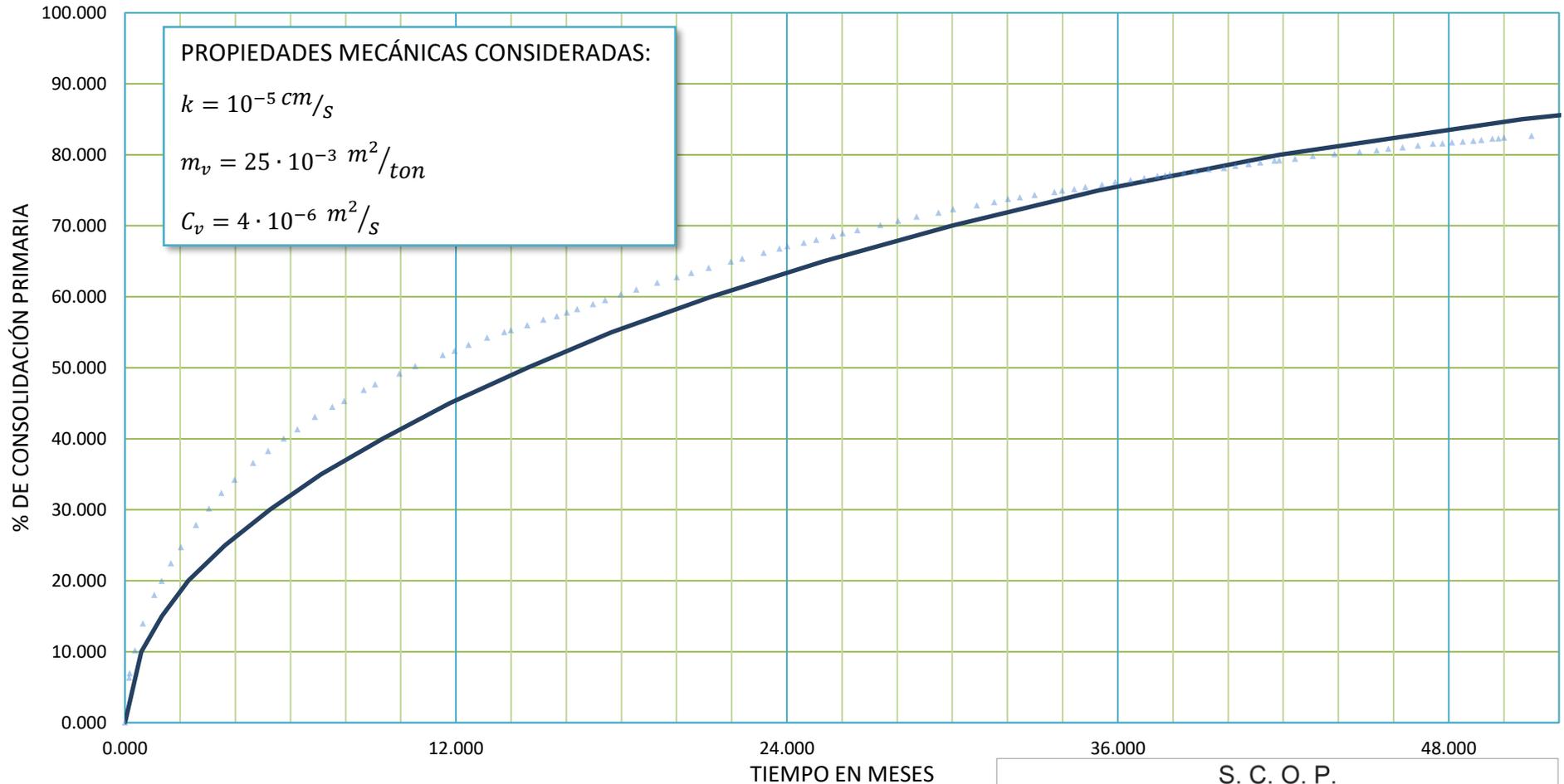
S. C. O. P.
 DIRECCIÓN GENERAL DE PROYECTOS Y LABORATORIOS
 DEPARTAMENTO DE GEOTÉCNIA
 OFICINA DE MECÁNICA DE SUELOS

CONDICIONES A

LARGO PLAZO

Propuso. EL JEFE DE DEPARTAMENTO Ing. Alfonso Rico Rodriguez	Aprobó. EL DIRECTOR GENERAL Ing. Alfredo Mendizábal Ogarrio
México D.F. Feb 1966	No. de Planos Anexo No.

VARIACIÓN DE LOS HUNDIMIENTOS CON EL TIEMPO CONSIDERANDO EL EFECTO DE LA CONSOLIDACIÓN PRIMARIA, PARA INCREMENTOS INFERIORES A 5 Ton/m²



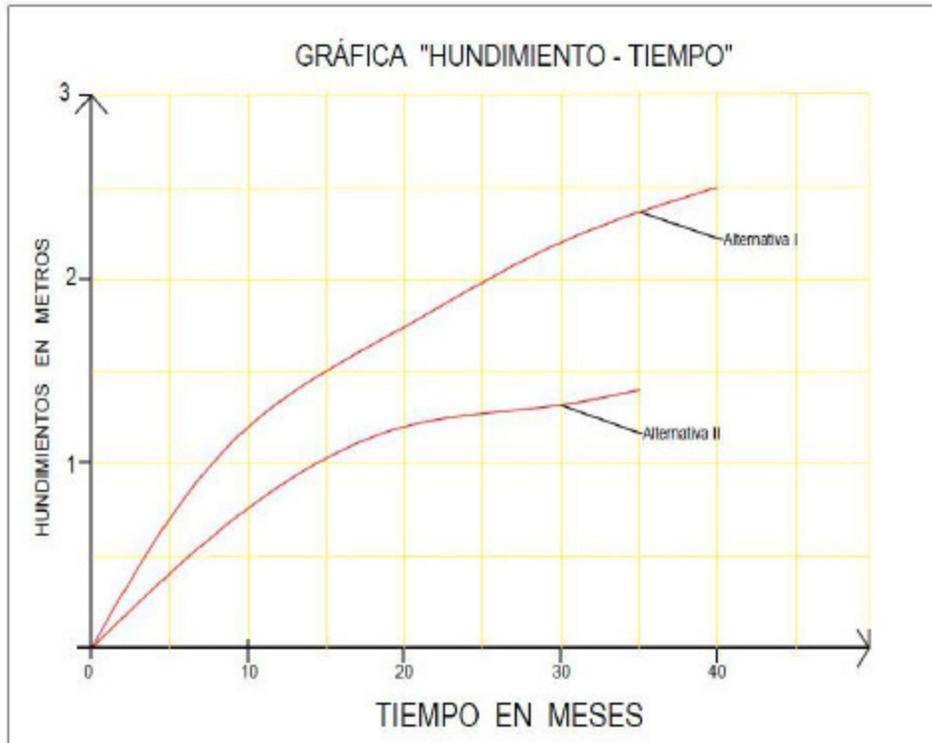
Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Anexo 7

S. C. O. P.	
DIRECCIÓN GENERAL DE PROYECTOS Y LABORATORIOS	
DEPARTAMENTO DE GEOTÉCNIA	
OFICINA DE MECÁNICA DE SUELOS	
TERRAPLENES DE PRUEBA	
CAMINO: PEÑÓN-TEXCOCO	
Propuso.	Aprobó.
EL JEFE DE DEPARTAMENTO	EL DIRECTOR GENERAL
Ing. Alfonso Rico Rodríguez	Ing. Alfredo Mendizábal Ogarrio

Anexo 8

VARIACIÓN DE LOS HUNDIMIENTOS CON EL TIEMPO

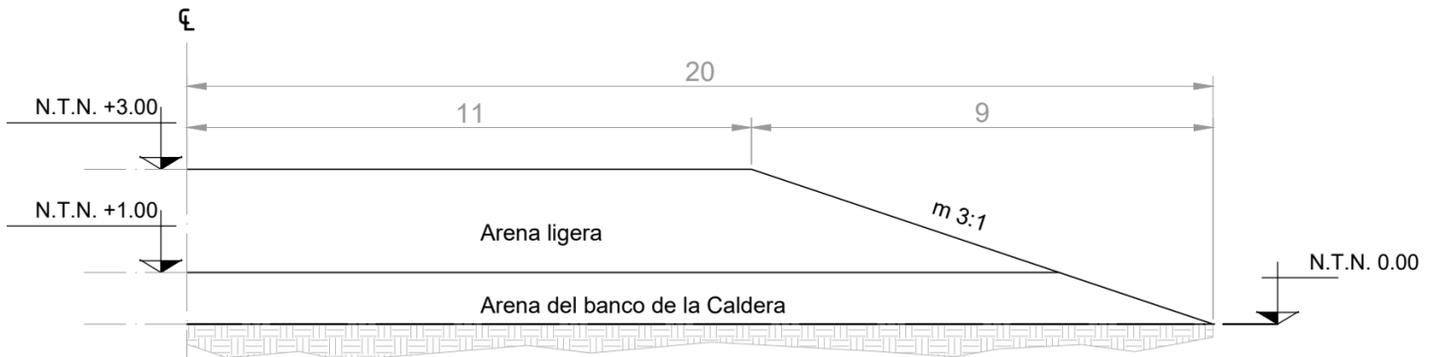


S. O. P.
DIRECCIÓN GENERAL DE PROYECTOS Y LABORATORIOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
OFICINA DE MECÁNICA DE SUELOS

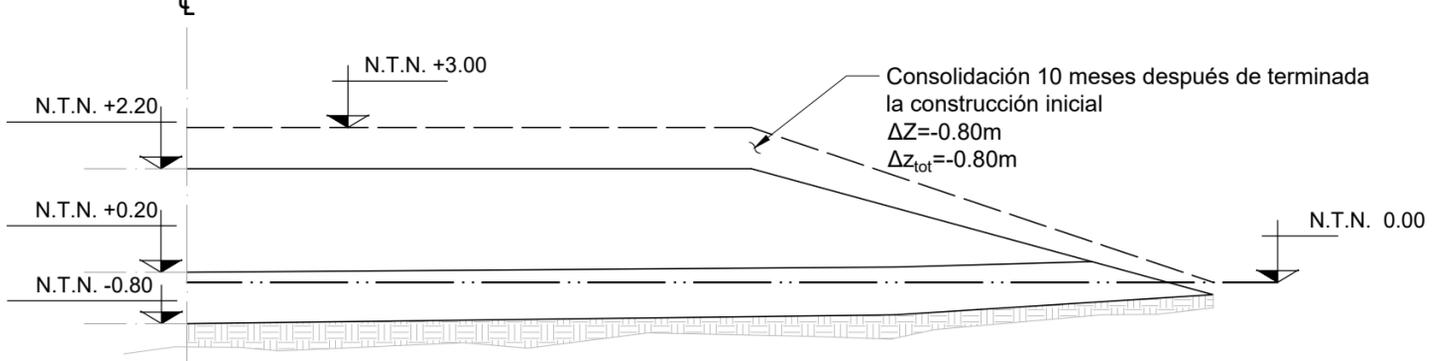
TERRAPLENES DE PRUEBA

CAMINO: PEÑÓN - TEXCOCO

a) Construcción inicial

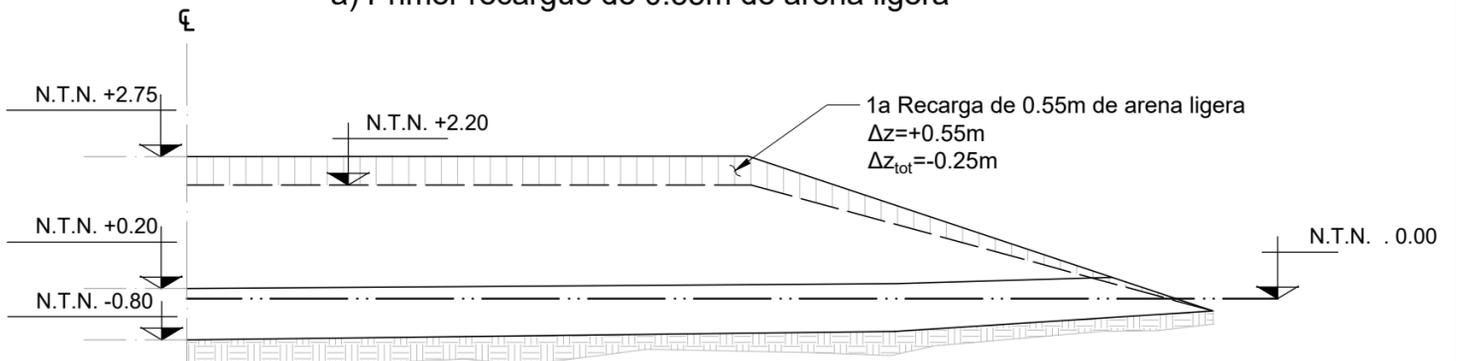


b) Consolidación en los primeros 10 meses

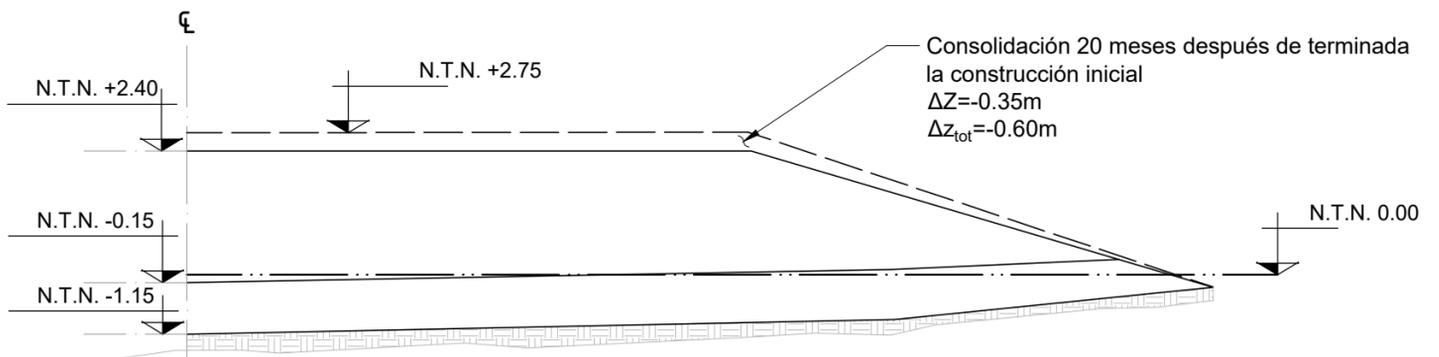


ETAPA 2: De la 1a Recarga de arena ligera a Consolidación en los primeros 20 meses

a) Primer recargue de 0.55m de arena ligera

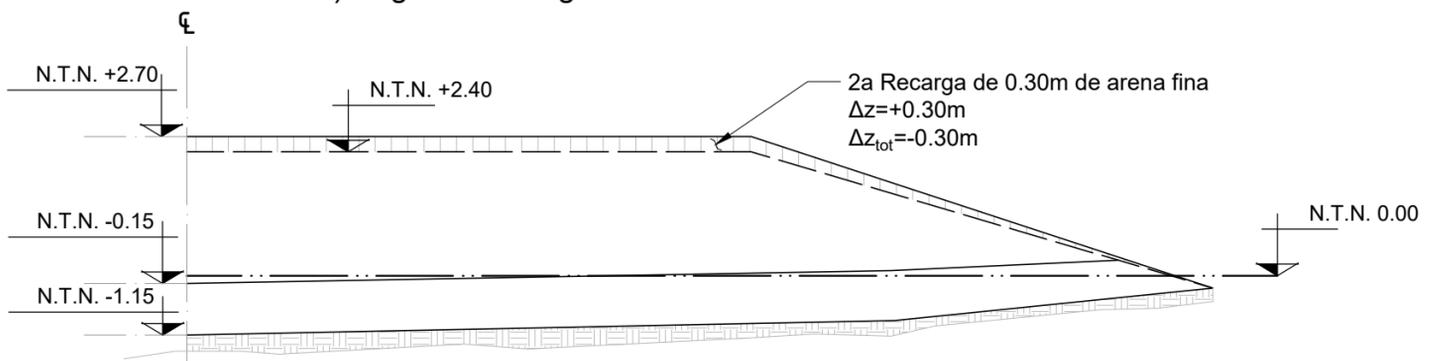


b) Consolidación en los primeros 20 meses

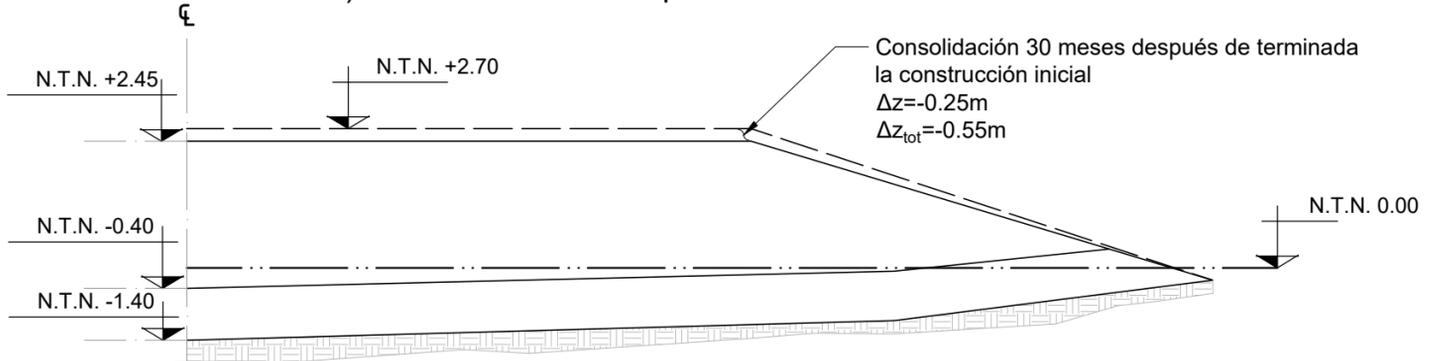


ETAPA 3: De la 2a Recarga de arena fina a Consolidación en los primeros 30 meses

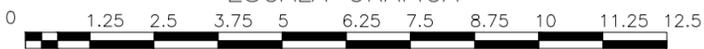
a) Segundo recargue de 0.30m de arena fina



b) Consolidación en los primeros 30 meses



ESCALA GRÁFICA



Cotas en metros

Jefatura de la mesa de estudios No. 2 y 3 Ing. Felipe Tecotl G. Ing. Gabriel García A.	Jefe de la sección de estudios Ing. G. Moreno Pecero	Jefe de la oficina de Mecánica de Suelos M. en I. Aguirre Menchaca
--	---	---

Camino: Directo Peñón - Texcoco
Tramo: El mismo
km:
Origen: Unidad Aragón, D. F.

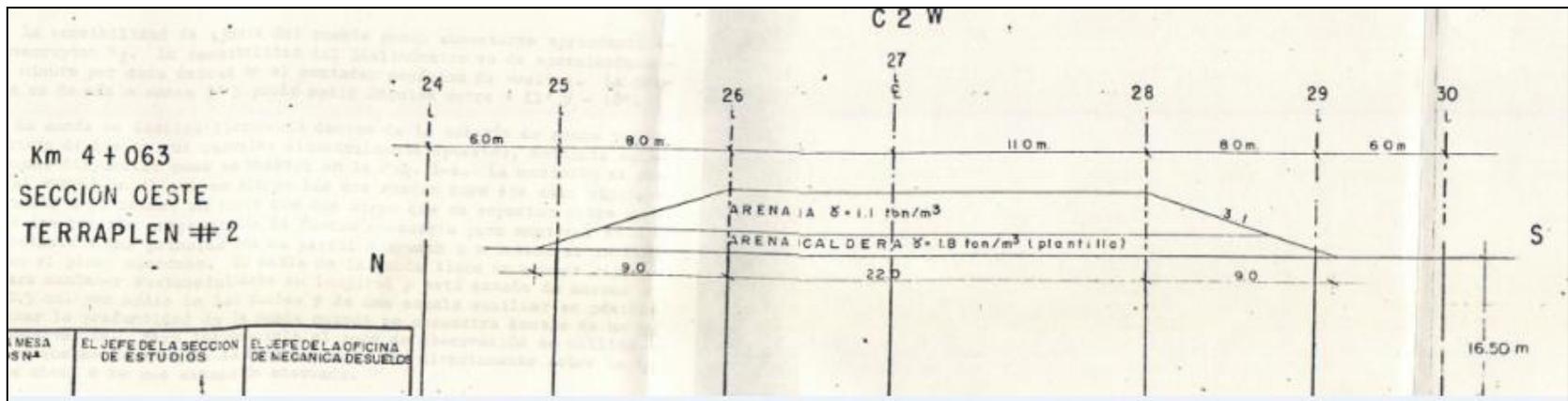
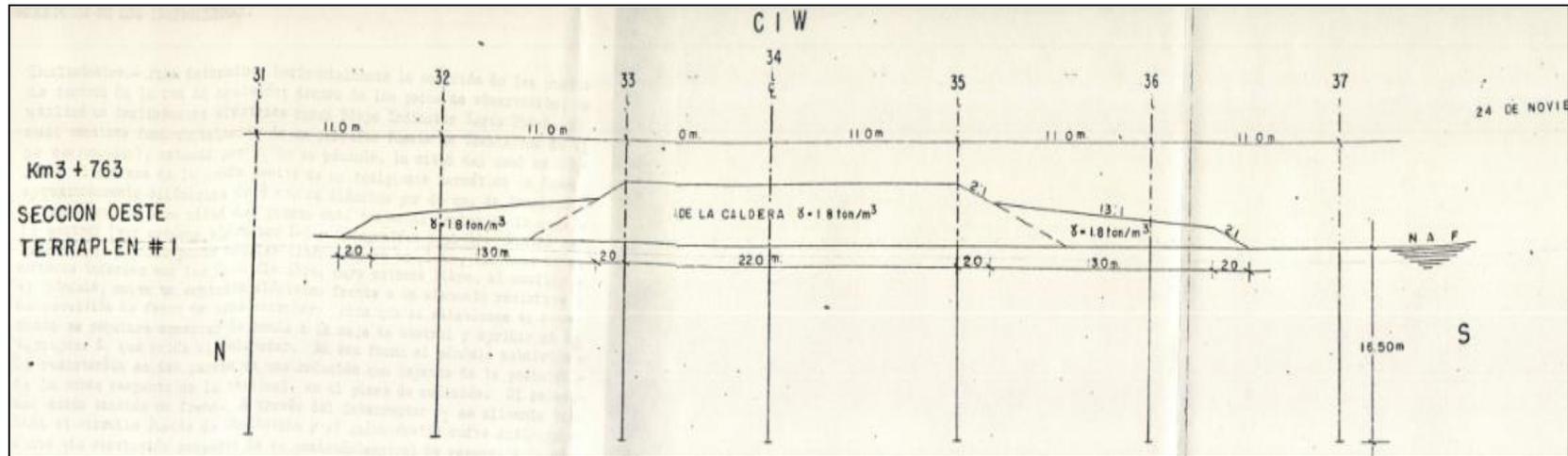
S. C. O. P.
DIRECCIÓN GENERAL DE PROYECTOS Y LABORATORIOS
DEPARTAMENTO DE GEOTÉCNIA
OFICINA DE MECÁNICA DE SUELOS

ETAPAS DE HUNDIMIENTOS PARA LA ALTERNATIVA II CONSIDERANDO EL 50% DE CONSOLIDACIÓN

Propuso. EL JEFE DE DEPARTAMENTO Ing. Alfonso Rico Rodríguez México D.F. 1965	Aprobó. EL DIRECTOR GENERAL Ing. Alfredo Mendizábal Ogarrio
No. de Planos	Anexo No. 5

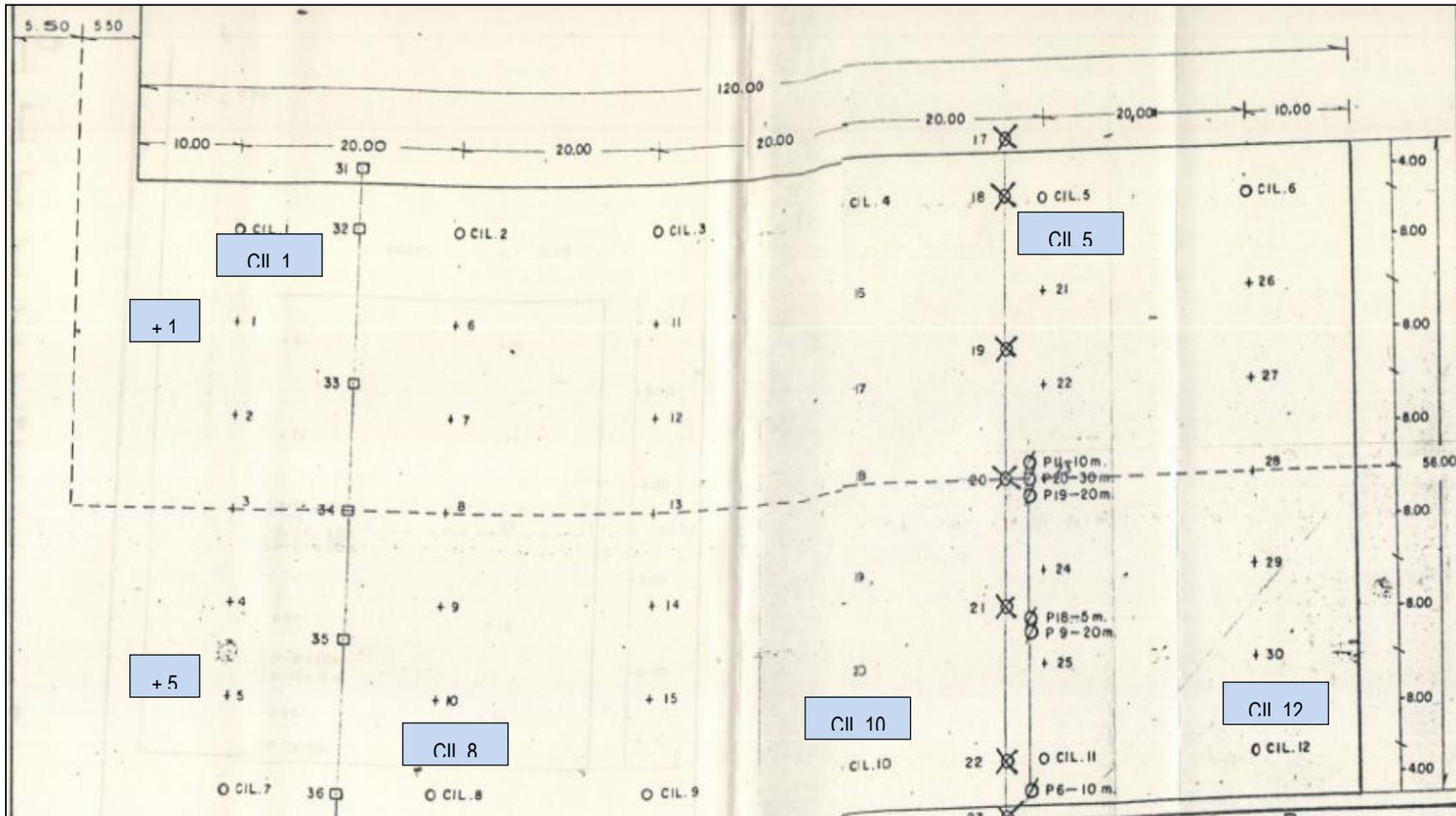
Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Anexo 10



Croquis elaborados por técnicos de la S.O.P. Secciones oeste de los terraplenes #1 y #2 respectivamente. Situación presentada el 24 de noviembre de 1965. Piezómetros ubicados a 16.50 m bajo el cuerpo del terraplén.

Anexo 11

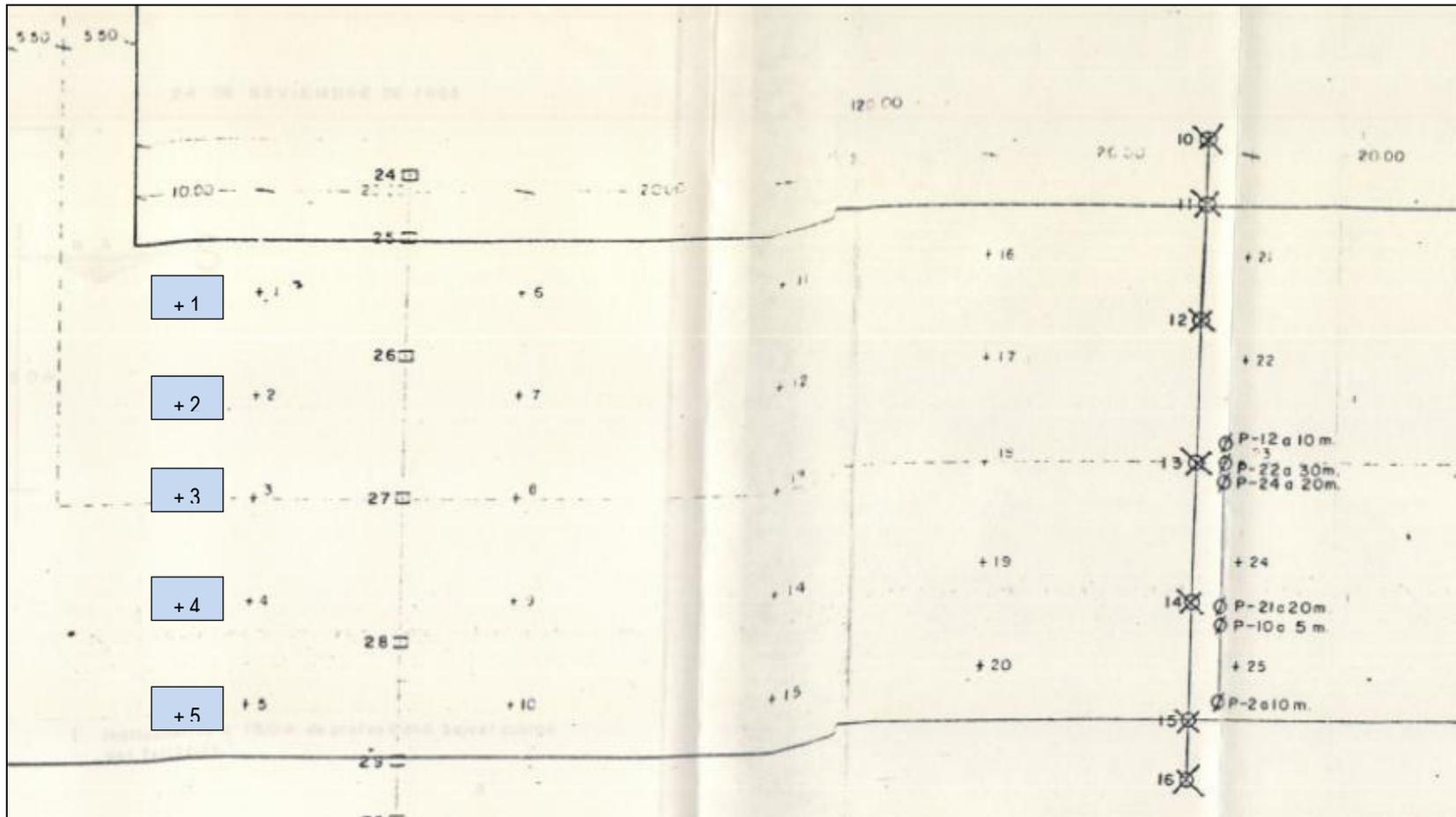


Croquis elaborado por técnicos de la S.O.P.

Localización de piezómetros y pozos de observación.

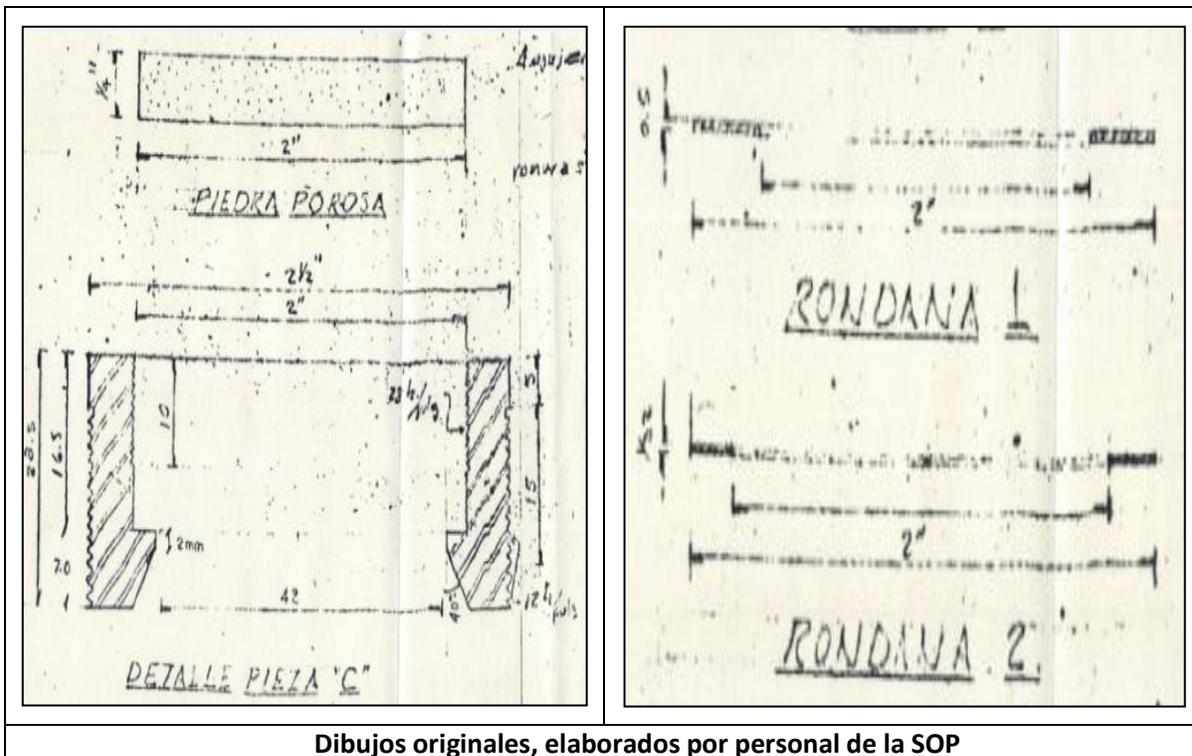
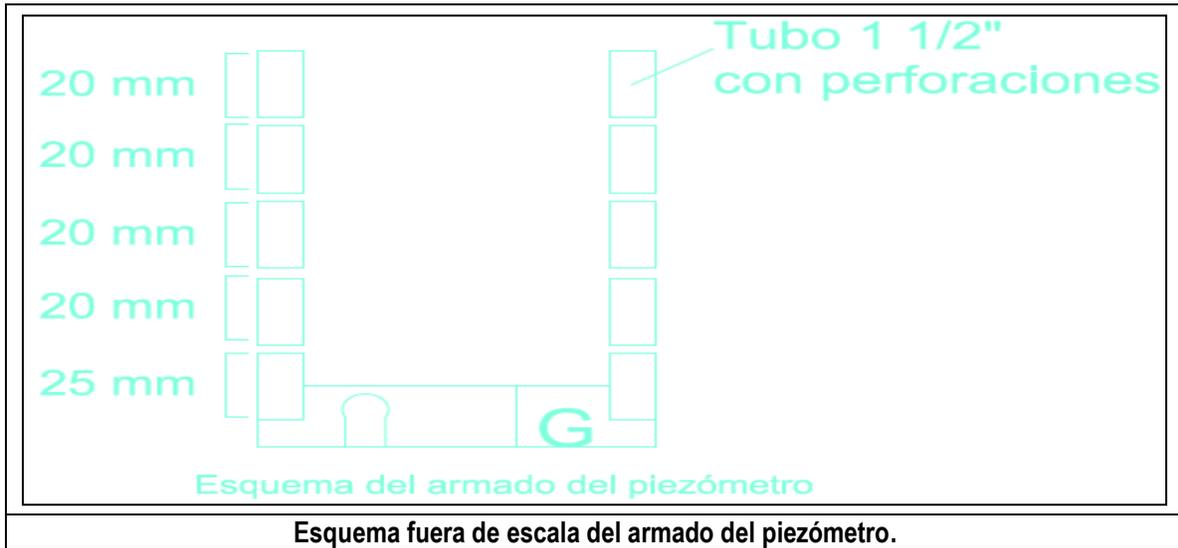
Experiencia y aprendizajes geotécnicos en el Lago de Texcoco

Anexo 12



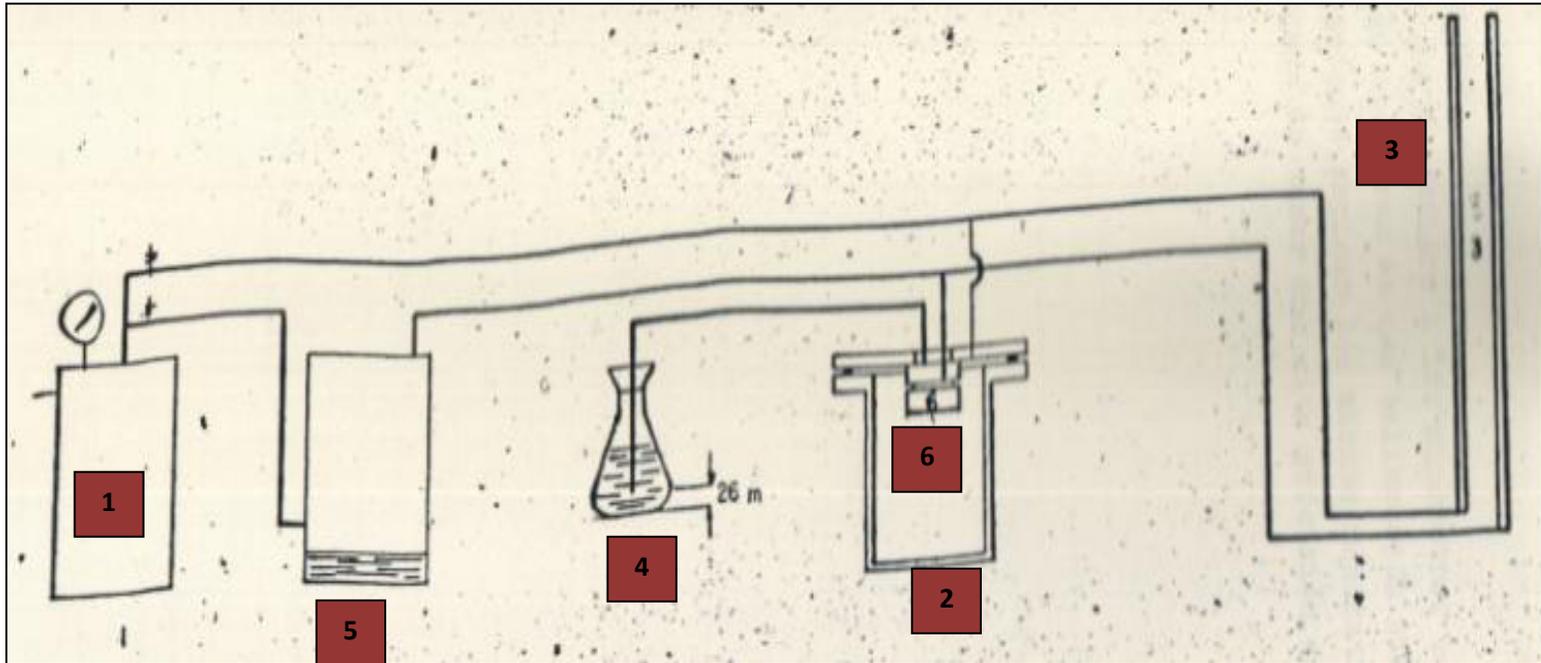
Croquis elaborado por técnicos de la S.O.P.

Anexo 13



En el segundo y tercer dibujo se representaron respectivamente la piedra porosa y una pieza "C", y rondanas que formaban parte del piezómetro.

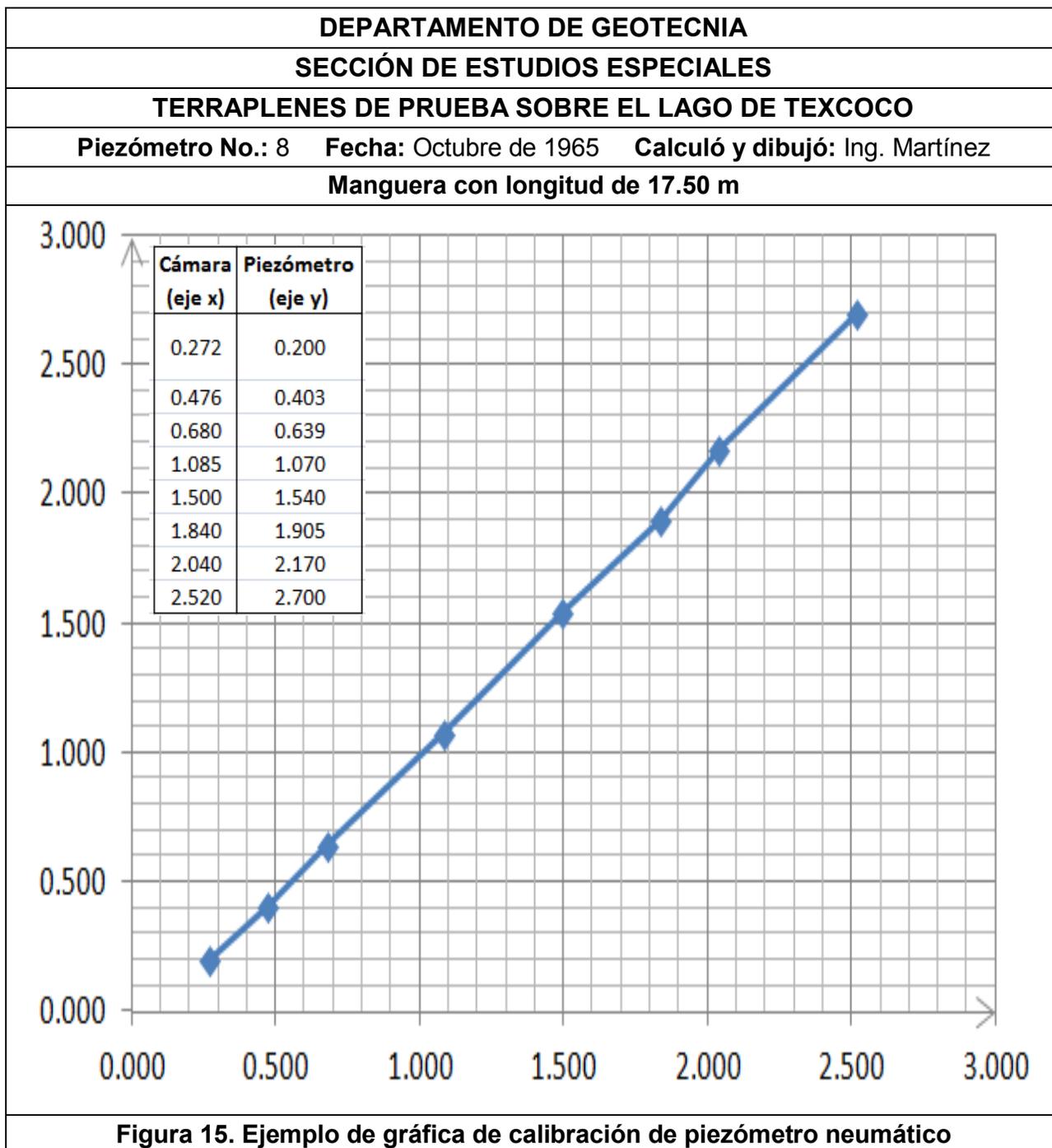
Anexo 14



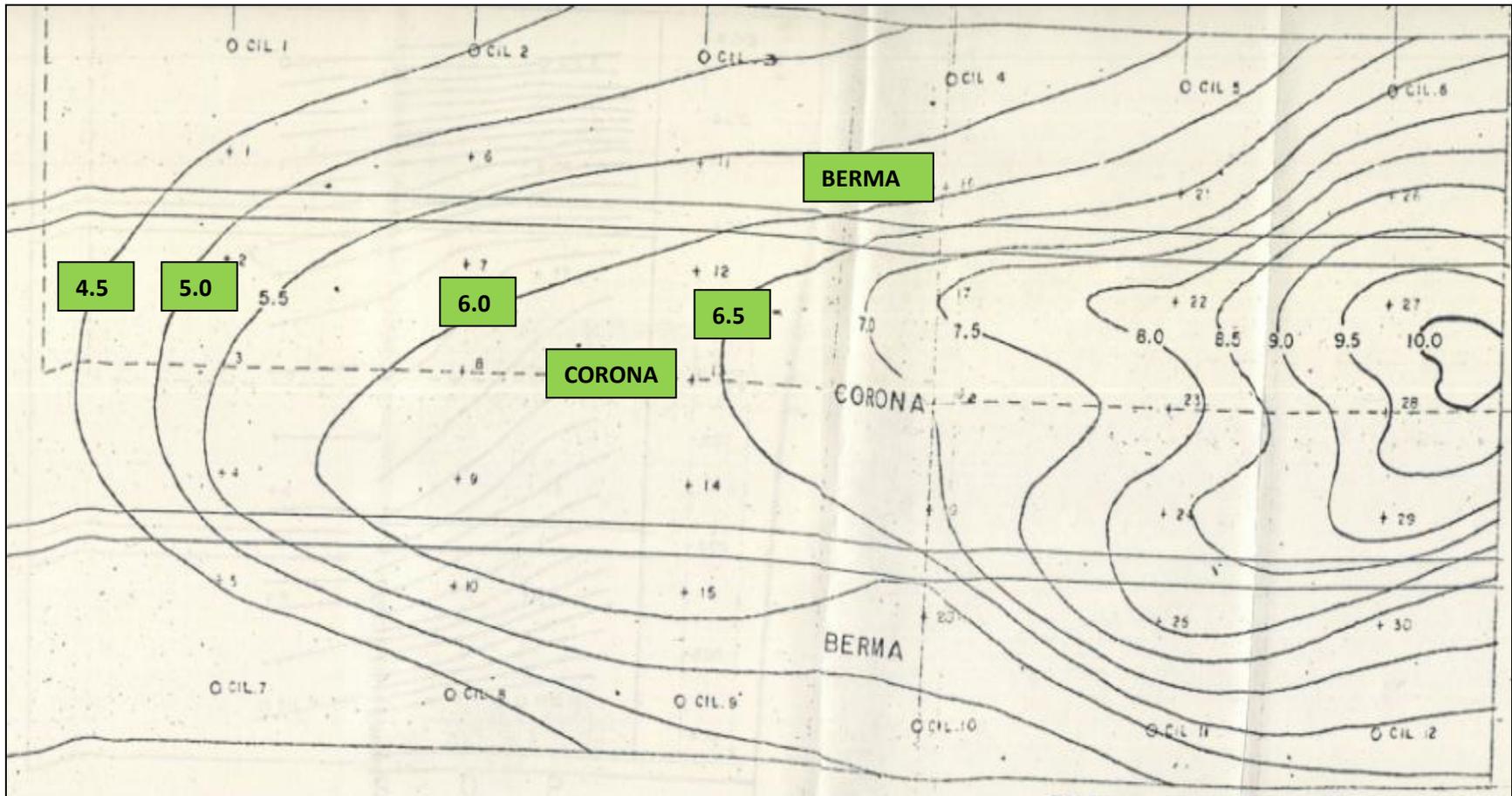
Dibujo de dispositivo para calibración de piezómetros, originariamente realizado por personal de la SOP del departamento de Geotecnia.

- 1.- Tanque alimentador de aire // 2.- Cámara de presión // 3.- Manómetros de mercurio // 4.- Frasco y tubo burbujeador
- 5.- Cante decantador de agua incluida en el aire // 6.- Piezómetro

Anexo 15



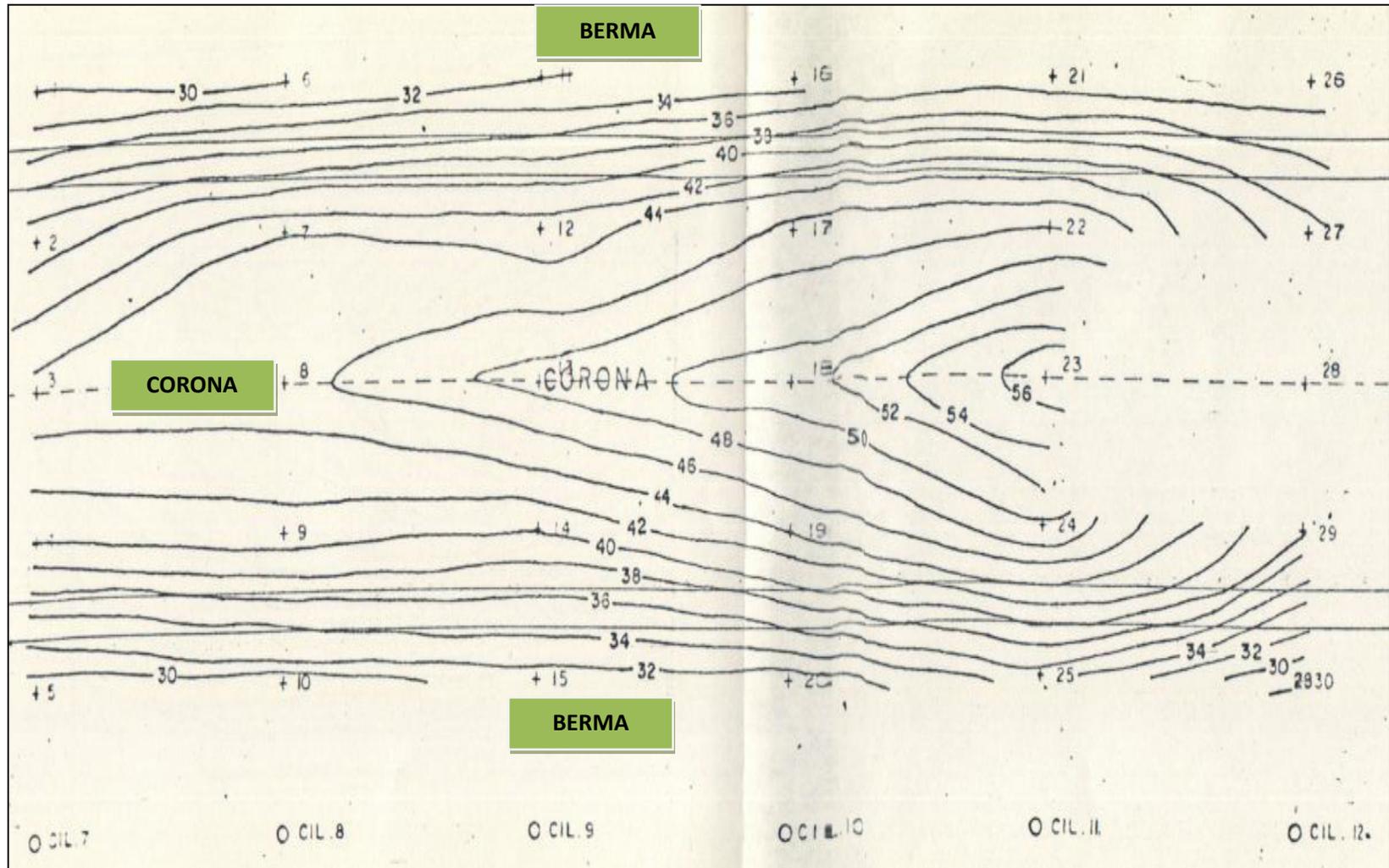
Anexo 16



Dibujo realizado por personal de la SOP

Hundimientos en cm, ocurridos del 19 al 30 de noviembre de 1965

Anexo 17



Dibujo realizado por personal de la SOP

6 Referencias

- + **CAMINO DIRECTO PEÑÓN-TEXCOCO. ESTUDIOS PARA PROYECTO.** Secretaría de Obras Públicas, México.
- + **Soil mechanics and foundations (ed. 3).** Muni Budhu (2011). EE. UU. JOHN ILEY & SONS, INC.
- + **Mecánica de Suelos Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de suelos (ed. 3).** Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. Editorial Limusa. México, D.F. (2012)
- + **Mecánica de Suelos Tomo 2. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de suelos (ed. 3).** Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. Editorial Limusa. México, D.F. (2012)
- + **Apuntes de Mecánica de Suelos. Volumen 1.** Deméneghi Colina, A., Puebla Cadena, M. y Sanginés García Héctor. División de Ingeniería Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería UNAM.
- + George Machan y Victoria G. Bennett. (2008). **Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects. State of the Practice.** Transportation Research. Circular Number E-C129.
- + Gabriel Moreno Pecero (2016). **LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA: APOYO FUNDAMENTAL DEL DESARROLLO TENOLÓGICO.** Geotecnia, SMIG. Número 239. Páginas 26 – 28.
- + Garnica Anguas, P. y Ramírez Culebro, J.A (2014). **Gestión de terraplenes y riesgos ante la inestabilidad.** Publicación Técnica No. 423. Querétaro, México.