

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“INSTRUMENTACIÓN  
GEOTÉCNICA APLICADA EN LAS  
LUMBRERAS L-18, L-19 Y L-20  
DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE”**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Juan Máximo Hernández Domínguez

**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. Héctor Alfredo Legorreta Cuevas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., ABRIL 2017.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al creador por haberme dado la oportunidad de pertenecer a este espacio-tiempo y darme la fuerza necesaria para luchar día a día.

Te agradezco mamá, por darme tanto cariño y amor, por haberme protegido y luchado ante todas las adversidades, por haberme enseñado el valor de los sacrificios; con tu esfuerzo y sabiduría me enseñaste que por muy mal que estén las cosas jamás debo sentirme derrotado, y mucho menos perder la fe. Toño, gracias por escucharme y darme los consejos más certeros cuando más los necesité. Lore, como si aún tuviese el alma de niño te agradezco por cuidarme y estar al pendiente de mí. Lolita, no tengo palabras para agradecer tanto cariño, amor y apoyo incondicional desde siempre. Gus, gracias por protegerme y enseñarme que esta vida también es para divertirnos. Te agradezco papá, por enseñarme a soñar con grandeza. Belí, gracias por el aguante de mis desvelos.

Gracias Faby, por todo el amor y apoyo que me das, paciencia, desvelos, regaños, comprensión, tolerancia y sobre todo por dejarme ser parte de su vida. Ángel, gracias por todas las sensaciones que has provocado, con ello aprendí a valorar y entender el cariño de mis padres y hermanos. Gracias familia Jaimes Hernández por el cobijo que me han dado en su hogar y nombrarme un miembro más, es todo un honor.

Agradezco a mis amigos y compañeros de CUFÍ, me siento muy orgulloso y satisfecho por haber compartido esta gran lucha, en la que por el simple hecho de conocernos nos hicimos ganadores.

Agradezco infinitamente a todos los profesores de la Facultad de Ingeniería, ya que con sus conocimientos, clases, consejos, regaños, etc. han formado una gran cantidad de ingenieros para la mejora de nuestro país.

A los profesores: Ing. Guzmán Olgúin, Ing Umaña Romero, Mtro. Lopez Montes, Ing. Sepúlveda Hirose, por brindarme su apoyo para la culminación de este trabajo y con ello cerrar un ciclo de mi vida. Un agradecimiento muy especial al Ing. Legorreta Cuevas, por sus conocimientos, paciencia, dedicación y apoyo incondicional para la elaboración de esta tesis.

Agradezco a la UNAM y a todas las personas que laboran en ella, ya que con su esfuerzo y dedicación hacen de esta la mejor Universidad del mundo.

Gracias a todos mis amigos, compañeros y colegas del TEO, tramo V; sin su apoyo no habría sido posible desarrollar este trabajo.

A mis colegas y amigos de vida: Rodrigo Moreno, Gilberto Moreno, Juan Reyes, Sergio Barrios, Fabiola Jaimes, me siento muy honrado por su amistad y cariño.

En fin, son tantas palabras que quisiera escribir para agradecer a cada uno de ustedes, simplemente esta etapa de mi formación profesional nunca la habría logrado sin su apoyo, cariño y paciencia; para todos y cada uno de ustedes les agradezco de todo corazón.

# “INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA APLICADA EN LAS LUMBRERAS L-18, L-19 Y L-20 DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE”

## ÍNDICE

1. Introducción.....	01
2. Antecedentes.....	03
3. Objetivo.....	04
4. Instrumentación utilizada en proyectos geotécnicos.....	05
4.1) Instrumentación Topográfica.....	05
4.1.1) Convergencias (extensómetros).....	05
4.1.2) Referencias superficiales (mojoneras radiales a la Lumbrera).....	06
4.1.3) Bancos de nivel profundo.....	07
4.2) Instrumentación Geotécnica.....	08
4.2.1) Inclínómetros verticales.....	08
4.2.2) Piezómetros abiertos (tipo Casagrande).....	11
4.2.3) Piezómetros eléctricos o de cuerda vibrante.....	14
4.2.4) Pozos de observación.....	15
4.3) Consideraciones para el uso, calibración o verificación y mantenimiento.....	16
4.3.1) Calibración.....	16
4.3.2) Verificación de calibración de sonda inclinométrica.....	17
4.3.3) Verificación de calibración de consola de cuerda vibrante.....	17
4.3.4) Consideraciones de uso y mantenimiento.....	18
5. Proyecto Túnel Emisor Oriente.....	20
5.1) Datos del proyecto.....	20
5.2) Ubicación de las Lumbreras.....	20
5.2.1) Geología general del TEO.....	21
5.3) Lumbrera No. 18, 19 y 20.....	23
5.3.1) Características geométricas.....	23
5.3.2) Perfil estratigráfico de la zona en estudio.....	24
5.3.3) Proceso constructivo.....	26
5.3.4) Descripción general del proceso constructivo de la Lumbrera L-20.....	28
6. Instrumentación instalada en las Lumbreras L-18, L-19 Y L-20 del TEO.....	33
6.1) Topográfica.....	33
6.1.1) Referencias superficiales.....	33
6.2) Geotecnia.....	34
6.2.1) Piezómetros.....	34
6.2.2) Inclínómetros.....	35
6.2.2.1) Principales mecanismos de falla para Lumbrera.....	36
6.2.2.1.1) Falla local en las paredes de la excavación.....	36
6.2.2.1.2) Falla por subpresión.....	36
6.2.2.1.3) Falla de fondo.....	37
6.2.2.1.4) Falla por flotación (emergimiento de la Lumbrera).....	37

6.2.3) Pozos de bombeo.....	38
6.2.4) Tubos de observación en el centro de la Lumbrera.....	38
7. Plan de monitoreo, procesamiento y presentación de la información recolectada.....	40
7.1) Monitoreo y lectura de inclinómetros.....	40
7.2) Monitoreo y lectura de piezómetros eléctricos.....	46
7.3) Monitoreo y lectura de tubo de observación instalado en el centro de la Lumbrera.....	52
7.4) Monitoreo y lecturas de referencias superficiales.....	55
8. Análisis e Interpretación de los datos obtenidos.....	57
8.1) Software.....	57
8.2) Inclinómetros.....	57
8.3) Piezómetros.....	60
8.4) Tubo de observación.....	61
8.5) Referencias superficiales.....	62
9. Conclusiones.....	64
10. Bibliografía.....	65
11. Referencias.....	65

# 1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas las obras civiles se han construido con una mayor complejidad y por ende se deben realizar diseños con características donde sus factores de seguridad sean admisibles y así garanticen la integridad de dichas obras. Como parte de las obras civiles se tienen contempladas la construcción de Lumbreras, este tipo de obras se construyen para distintos fines: cárcamos de bombeo, obra de captación, acceso a un túnel, acceso para el ensamble del equipo de excavación de túnel (tuneladora, escudo, etc.), mantenimiento de un túnel, drenaje, agua potable, obra de desvío, etc.

Aunado a lo anterior la construcción de la lumbrera no ha sido la excepción, independientemente de los diferentes métodos de construcción (flotación, método convencional, tabla estacado, muro Milán, etc.), monitorear el comportamiento de la estructura es fundamental para garantizar la seguridad de los usuarios, equipo en uso y también para verificar las acciones del terreno circundante como: empujes, sobrecargas y esfuerzos neutros considerados en el diseño original, verificarlos para evitar cualquier riesgo y así poder tomar medidas preventivas y/o correctivas para la construcción de la misma.

La historia de la ciudad de México nos indica que durante el siglo XX, y debido a la sobre explotación del agua del subsuelo, en el centro del valle de México se alcanzaron hundimientos del orden de 10 m y en la zona del sur del valle (Texcoco, Xochimilco y Chalco) se ha alcanzado una tasa de hundimiento del orden de los 30 cm anuales.

De acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, el valle de México puede ser dividido en tres principales zonas geotécnicas (ver figura 01):

Zona I: Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre.

Zona II: Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre.

Zona III: Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros.

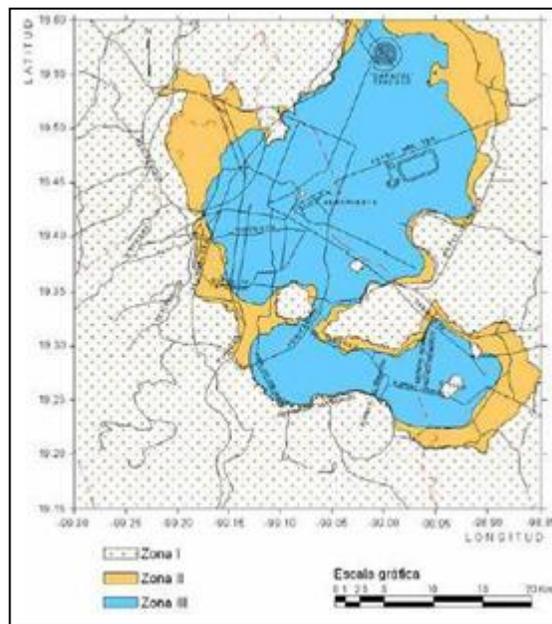


Figura 01: Zonificación del valle de México, NTCC del DF 2004 <sup>(1)</sup>.

Para resolver la problemática del sistema de drenaje fue necesaria la construcción y proyección de un nuevo drenaje profundo: el Túnel Emisor Oriente de 62 Km de longitud y 7 m de diámetro que tendrá una capacidad de 150 m<sup>3</sup>/s en promedio. Esta obra permitirá contar con una salida complementaria y alterna al Emisor Central, que abatirá el riesgo de inundaciones en la Ciudad de México y su zona conurbada. En temporada de lluvias, funcionará de manera simultánea con el actual drenaje profundo y, en época de secas, lo hará alternadamente para facilitar su mantenimiento. Además la CNA ha realizado la propuesta de la construcción de 5 plantas de tratamiento para la reutilización del agua del desagüe de la ciudad, actualmente se construye la planta de tratamiento Atotonilco para que posteriormente el agua tratada sirva para riego en los cultivos del valle del Mezquital y zonas cercanas (ver figura 02).



Figura 02. Croquis general del sistema de drenaje y desagüe de la ciudad de México <sup>(2)</sup>.

## 2. ANTECEDENTES

Tanto en la antigüedad como en la época actual, el lugar donde se asientan los pueblos, origina muchos de los retos que deben enfrentar sus habitantes para alcanzar el desarrollo y bienestar; tal es el caso de la Ciudad de México, la cual y debido a su ubicación tuvo enfrentamientos, durante vario siglos, por el problema de las inundaciones.

La fundación de la gran Tenochtitlán (hoy ciudad de México) en el centro de un lago tuvo grandes beneficios tales como tener gran cantidad de recursos naturales, pero a su vez tuvo gran dificultad para poder controlar las grandes cantidades de aguas de lluvias hasta llegar a inundaciones de manera constante. Conforme fue creciendo la ciudad de México se presentaban grandes problemas, el principal fue desalojar las aguas pluviales y sanitarias estancadas en el valle de México por la falta de salidas naturales.

Con el crecimiento de la población, asentamientos y por la llegada de los españoles se tuvo la necesidad de crear salidas artificiales para desalojar las aguas y para ello en 1607 se inició la construcción de un túnel en la zona de Nochistongo al noroeste del valle de México, el cual pocos años después se derrumbo y se opto por construir un tajo (tajo de Nochistongo) que actualmente se encuentra en operación.

A finales del siglo XIX se inicio la construcción del gran canal y el Túnel de Tequisquiac, obras concluidas hasta 1900. En 1950 se amplió la red de desagüe y se realizo la construcción del segundo Túnel de Tequisquiac

Para desalojar el agua de la zona del poniente del valle de México, en 1960 se construyó el Interceptor y Emisor del Poniente y posteriormente las aguas se descargan al tajo Nochistongo.

Debido a que el sistema de desagüe de la ciudad de México se veía afectado por los problemas de hundimientos, en 1975 se concluyó la construcción de los túneles que forman parte del Sistema de Drenaje Profundo, los cuales alcanzaron una longitud de 68Km y debido a la profundidad se pronostico que este no se vería afectado por los hundimientos regionales de la ciudad de México.

En el año 2006 personal del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, realizo inspecciones en el interior de los túneles que presentaban un funcionamiento hidráulico inadecuado, visualizando un deterioro de su revestimiento y exposición del acero de refuerzo debido la presencia de gases causados por la descomposición de la materia orgánica que transportan las aguas residuales y daños ocasionado por el arrastre de sólidos.

Sin embargo, como bien se sabe, en los últimos veinte años la capacidad total de desalojo del Sistema de Drenaje de la Ciudad de México disminuyó de 280 m<sup>3</sup>/segundo, en 1975, a 165 m<sup>3</sup>/segundo, en el 2007, es decir una reducción del 40%. La estimación más aceptada del requerimiento de capacidad de desalojo del Sistema ronda los 315 m<sup>3</sup>/segundo. A la par, otro factor importante a considerar es que la población aumentó de 10 a 19 millones de personas y la ciudad ha mantenido un incremento en su nivel de hundimiento por la sobre explotación de los mantos acuíferos, lo cual dificulta que las aguas negras sean desalojadas de la cuenca.

Si a esos factores agregamos eventos pluviales extraordinarios que literalmente han logrado tronar (en años recientes) el conducto hidráulico original causando graves inundaciones y daños a una amplia zona residencial, se evidencia el peligro de un colapso monumental del Sistema de Drenaje de la Ciudad de México, de ahí la relevancia de las obras que se llevan a cabo bajo tierra, que no se ven pero que son fundamentales para garantizar no solo la calidad de vida, sino también la seguridad.

### 3. OBJETIVO

El acelerado crecimiento del área urbana del Valle de México, los asentamientos regionales inducidos por el bombeo excesivo de agua del subsuelo y las intensas lluvias presentadas en las últimas fechas han provocado que la infraestructura hidráulica de drenaje resulte insuficiente y para atender las necesidades ordinarias derivadas de los fenómenos meteorológicos la CNA decidió llevar a cabo una serie de obras para mejorar el sistema de conducción y desalojo de aguas residuales y pluviales fuera del Valle de México, entre las que destaca la construcción del Túnel Emisor Oriente

Este proyecto tiene como objetivo fundamental disminuir los riesgos asociados a la falla estructural o de funcionamiento de los sistemas de drenaje del Valle de México, entre los beneficios que este proyecto generará se encuentran: evitar fallas en el sistema ante un bloqueo del Emisor Central, disminuir el riesgo de inundaciones, al contar con capacidad suficiente para el desalojo de aguas residuales y pluviales, así como un impacto ambiental positivo, al conducir las aguas colectadas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco, pues de materializarse los riesgos existentes de daños a las personas, y al medio ambiente serían de una gran magnitud.

El Túnel Emisor Oriente contará con 25 lumbreras con profundidades desde 30 hasta 150 metros, diámetros de 16 y 12 metros. Para observar el comportamiento de una Lumbrera, previo, durante y posterior a su construcción se puede apoyar en la instrumentación geotécnica, tales como son: los inclinómetros, piezómetros abiertos (Tipo Casagrande), piezómetros eléctricos, tubos de observación, convergencias, referencias superficiales y bancos de nivel profundo entre los más importantes.

La instrumentación se utiliza para cuantificar con precisión ciertos parámetros de comportamiento estructural y supervisar los posibles cambios. Se puede monitorizar la estabilización de la lumbrera o, en el caso de cambios, deducir la posibilidad de fallo. La comparación de los valores medidos con los valores de diseño permite la supervisión de la estabilidad de la lumbrera y la posibilidad de aplicar medidas correctoras en el momento oportuno. Ciertos proyectos, como lumbreras en suelos blandos, que se llevan a cabo en las zonas urbanas, serían prácticamente imposible de lograr sin la instrumentación y los sistemas automatizados de adquisición de datos.

A partir del diseño de la estructura se deben obtener parámetros físicos (deformaciones de la estructura, abatimiento de presiones de poro, desplazamientos horizontales y verticales del suelo, etc.), para poder correlacionar los valores obtenidos con las mediciones realizadas en campo con la instrumentación geotécnica.

Idealmente, la instalación de la instrumentación debe de realizarse previamente al inicio de la obra para conocer las condiciones iniciales previo a la construcción, sin embargo, algunas instalaciones de la instrumentación deben instalarse paralelo a la construcción de la Lumbrera, por ejemplo las referencias para tomar lecturas de convergencia del muro y/o anillos.

El objetivo de este trabajo es describir los trabajos realizados de instrumentación geotécnica utilizados en las Lumbreras L-20, L19 y L-18 del Túnel Emisor Oriente, y así mismo resaltar la importancia y beneficios de la instrumentación instalada en las obras de este tipo.

## 4. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA EN PROYECTOS GEOTÉCNICOS

### 4.1) INSTRUMENTACIÓN TOPOGRÁFICA

#### 4.1.1) Convergencias (extensómetros)

Las convergencias nos ayudan a conocer si existen deformaciones (cambios de diámetro) en el interior de la estructura, debido a esfuerzos cortantes que actúen en las paredes de la Lumbraera. Para realizar las mediciones se colocan armellas, palomas, testigos y/o referencias (puntos fijos de control) en el diámetro de una sección de la Lumbraera (ver figuras 03 y 04). Las mediciones se realizan utilizando extensómetros, distanciómetros y/o estación total; generalmente los monitoreos se realizan en puntos diametralmente opuestos y en ocasiones se combinan o alternan los puntos (ver figuras 05 y 06).



Figura 03. Esquema de colocación de armella (punto fijo de control) para la medición de convergencias en la Lumbraera.

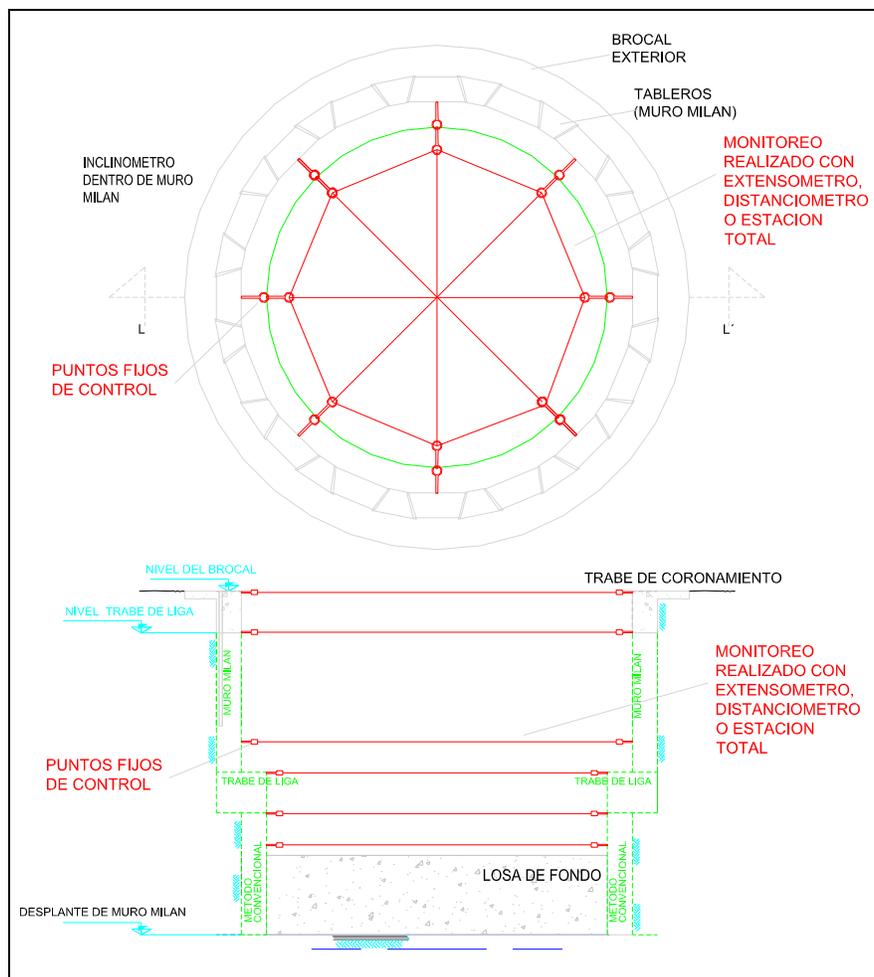


FIGURA 04. Esquema general de colocación de puntos fijos de control para la medición de convergencias en Lumbraera.



FIGURA 05. Medición de convergencias con extensómetro <sup>(3)</sup>.



FIGURA 06. Ejemplo de medición con distanciómetro laser <sup>(4)</sup>.

#### **4.1.2) Referencias superficiales (mojoneras radiales a la Lumbrera)**

Las referencias superficiales, mojoneras, bancos de nivel, puntos de control, etc., ayudan en gran medida a verificar si existen asentamientos y/o abundamientos en el suelo debido a las actividades de construcción y propiamente al proceso constructivo de la estructura. Además sirven para observar si existen cambios de posición en el suelo perimetral de la estructura.

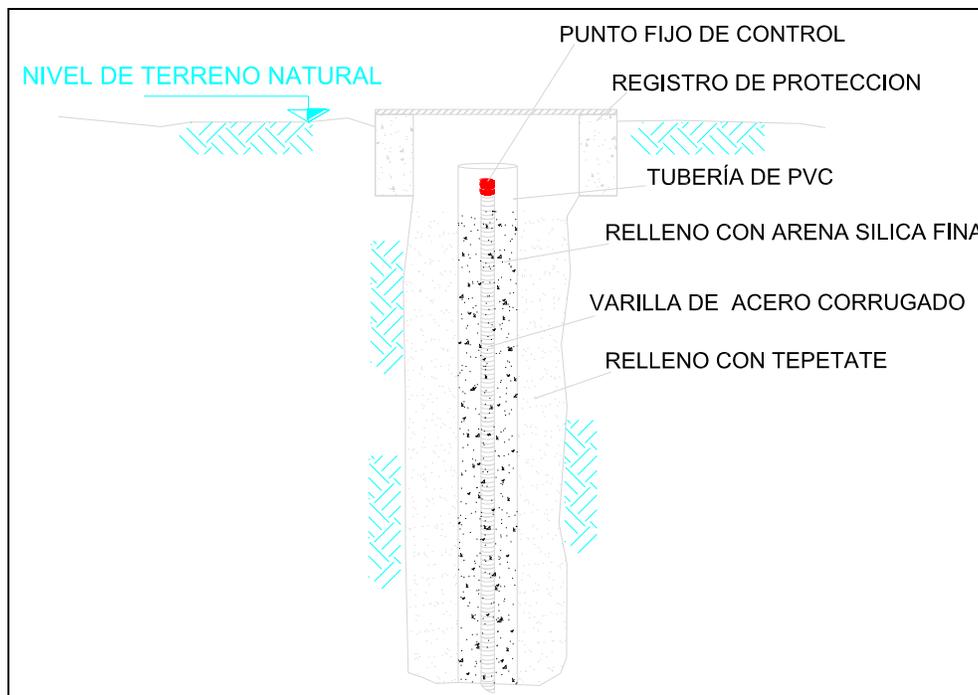


FIGURA 07. Esquema general de instalación de banco de nivel (punto fijo de control) para la medición de asentamientos y posición de suelo perimetral a la Lumbrera.

Básicamente una referencia superficial consiste en hincar una estructura (generalmente una varilla con lastre) en el suelo natural; si existe mejoramiento de suelo la varilla tiene que sobrepasar hasta encontrar el terreno natural (ver figura 07 y fotografía 01).

Los monitoreos se realizan con equipos de topografía: nivel electrónico, estación total, niveletas, plomos, etc (ver figuras 08, 09 y fotografía 02).



FIGURA 08 Nivel electrónico <sup>(5)</sup>.



FIGURA 09 Estación total <sup>(6)</sup>.



FOTOGRAFIA 01. Construcción de puntos de control para verificar si existen asentamientos en la periferia de la Lumbrera.



FOTOGRAFIA 02 Monitoreo de puntos de control con nivel electrónico.

#### **4.1.3) Bancos de nivel profundo**

Los bancos de nivel profundo, son puntos fijos (visto topográficamente), ya que este no sufrirá los asentamientos y/o abundamientos regionales que se puedan presentar en la superficie.

Para la instalación de un banco de nivel profundo, previamente se deben realizar estudios para conocer la estratigrafía del sitio a instalarse, con ello se conoce la profundidad en la que se encuentran estratos no deformables (estrato de suelos duros o de roca). La instalación de un banco de nivel profundo, básicamente consta de una columna metálica delgada, anclada a un muerto de concreto apoyado en un estrato indeformable y en su extremo superior termina en un vértice en donde se apoya el estadal (ver figura 10).

Los monitoreos se realizan con equipos de topografía: estación total, niveles electrónicos, etc.

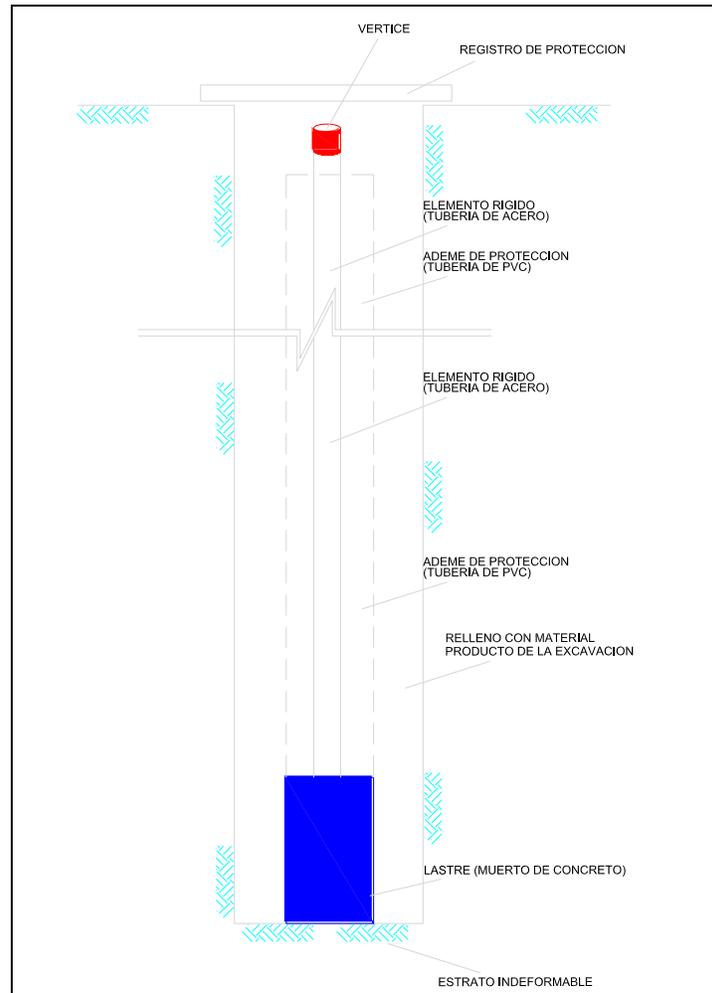


FIGURA 10. Esquema general de instalación de bancos de nivel profundo.

## 4.2) INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

### 4.2.1) Inclinómetros verticales

Éste tipo de instrumento se utilizan para conocer los desplazamientos horizontales que se puedan presentar en la periferia de la construcción de la Lumbreira si se encuentran instalados en terreno natural o en la estructura si estos están instalados dentro del muro Milán (ver figura 11).

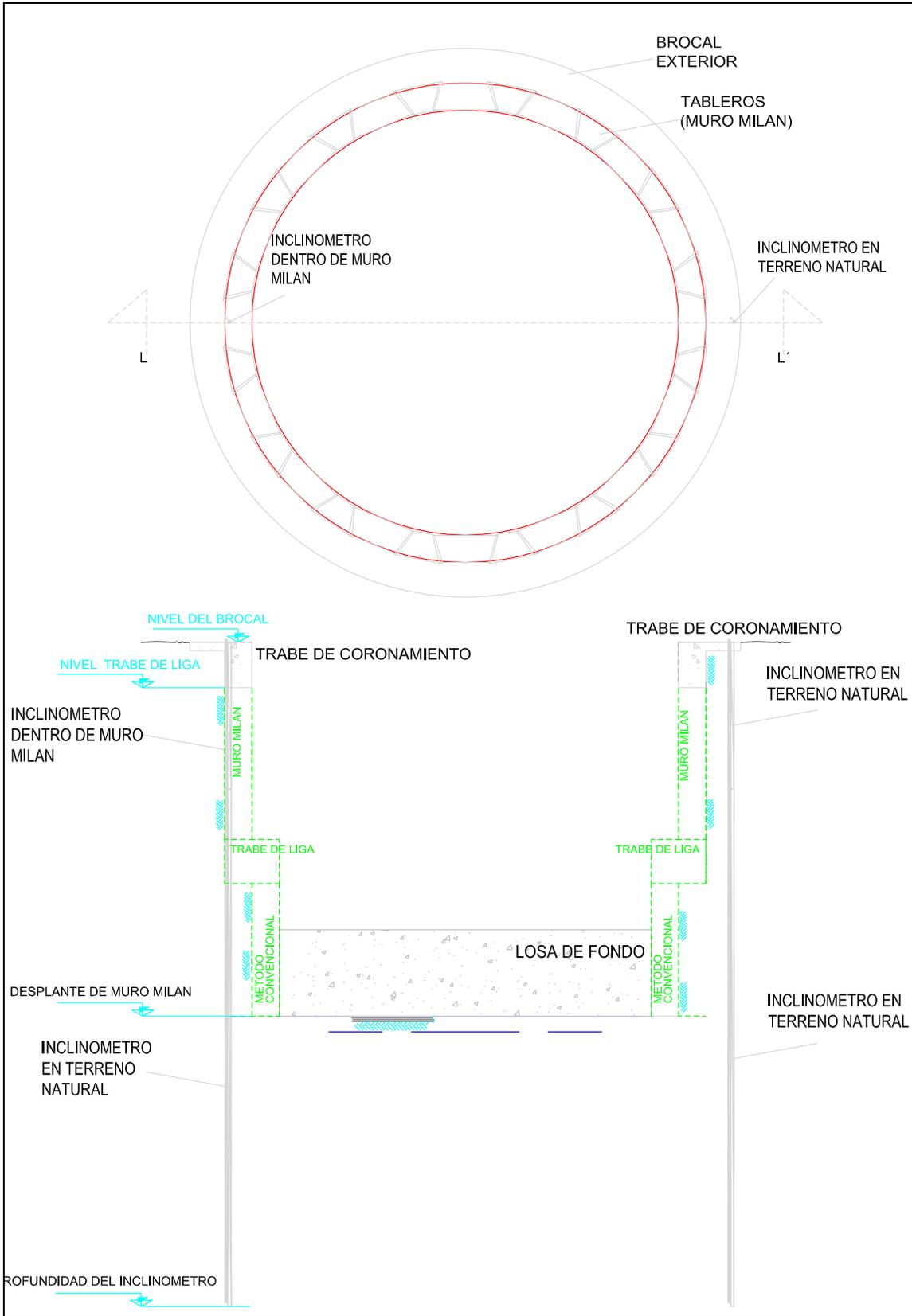


FIGURA 11. Esquema de construcción de lumbra y ubicación de inclinómetros en muro Milán y en suelo

Para la instalación de estos se utiliza tubería tipo ABS, la cual se coloca dentro de un barreno libre y posteriormente en su espacio anular se inyecta mezcla grout (agua-cemento-bentonita). El diseño del Inclínómetro, generalmente lo determina el tipo de suelo a instalarse, el diámetro y profundidad de la Lumbrera (ver figuras 12 y fotografía 03).

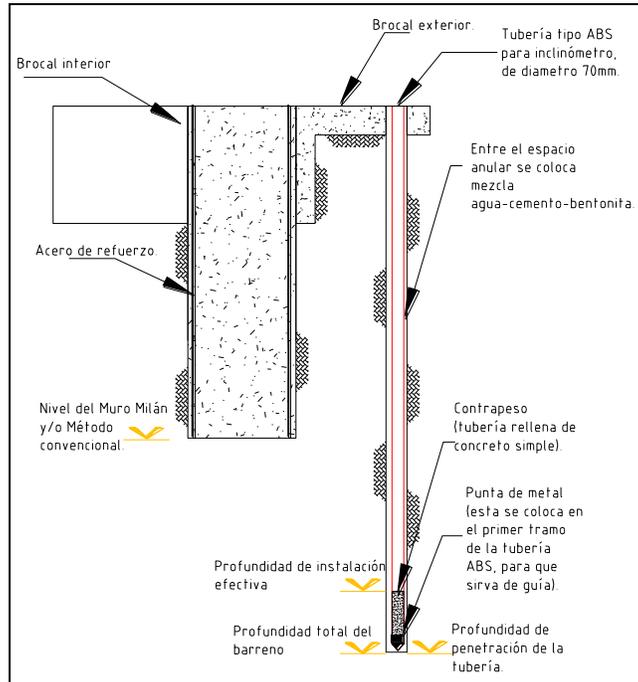


FIGURA 12. Esquema de instalación de un Inclínómetro vertical de lumbrera.

Para realizar la medición de dichos instrumentos se utilizan sondas inclinométricas (ver figura 14). Las sondas de primera generación de este tipo, consisten en la fabricación de un torpedo de metal y en su interior se coloca un péndulo, y a su vez está conectado con un circuito el cual emite pulsaciones eléctricas de distinta intensidad de acuerdo a la inclinación del péndulo (éstas se descalibran con mucha facilidad). Las sondas que se fabrican actualmente están compuestas por sensores que emiten señales eléctricas proporcionales al seno del ángulo de inclinación del tubo inclinométrico. Las sonda inclinométrica actual básicamente es un dispositivo eléctrico denominado servo-acelerómetro (cuenta con dos) indica las variaciones de las inclinaciones de la tubería en toda su profundidad y principalmente en los planos de deslizamiento y/o desplazamiento activo (figura 13 y fotografía 04).

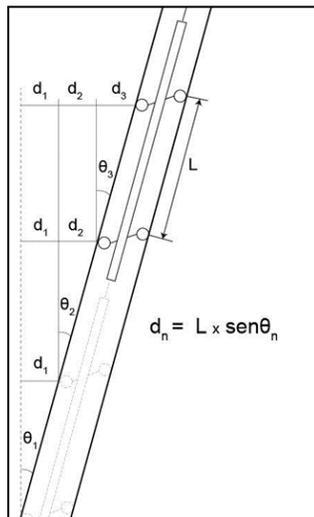
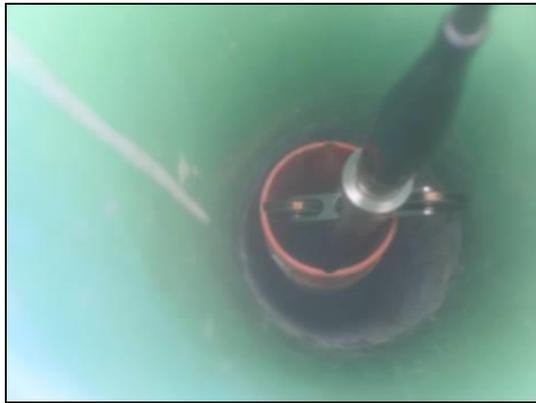


FIGURA 13. Funcionamiento de sonda inclinométricas (7).



FIGURA 14. Sonda inclinométrica (8).



**FOTOGRAFIA 03.** Monitoreo de Inclínómetro; introducción de sonda inclinométrica dentro de la tubería ABS.



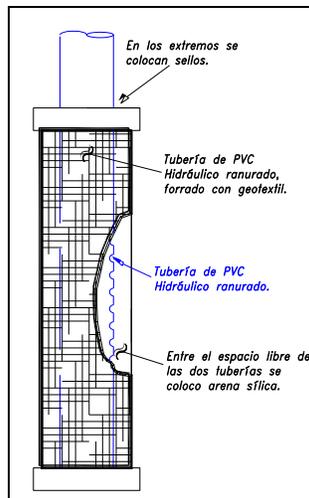
**FOTOGRAFIA 04.** Monitoreo de Inclínómetro en Muro Milán.

#### **4.2.2) Piezómetros abiertos (tipo Casagrande)**

Con los piezómetros tipo Casagrande se conoce la presión de poro existente en el subsuelo a la profundidad que se haya instalado (ver figura 16).

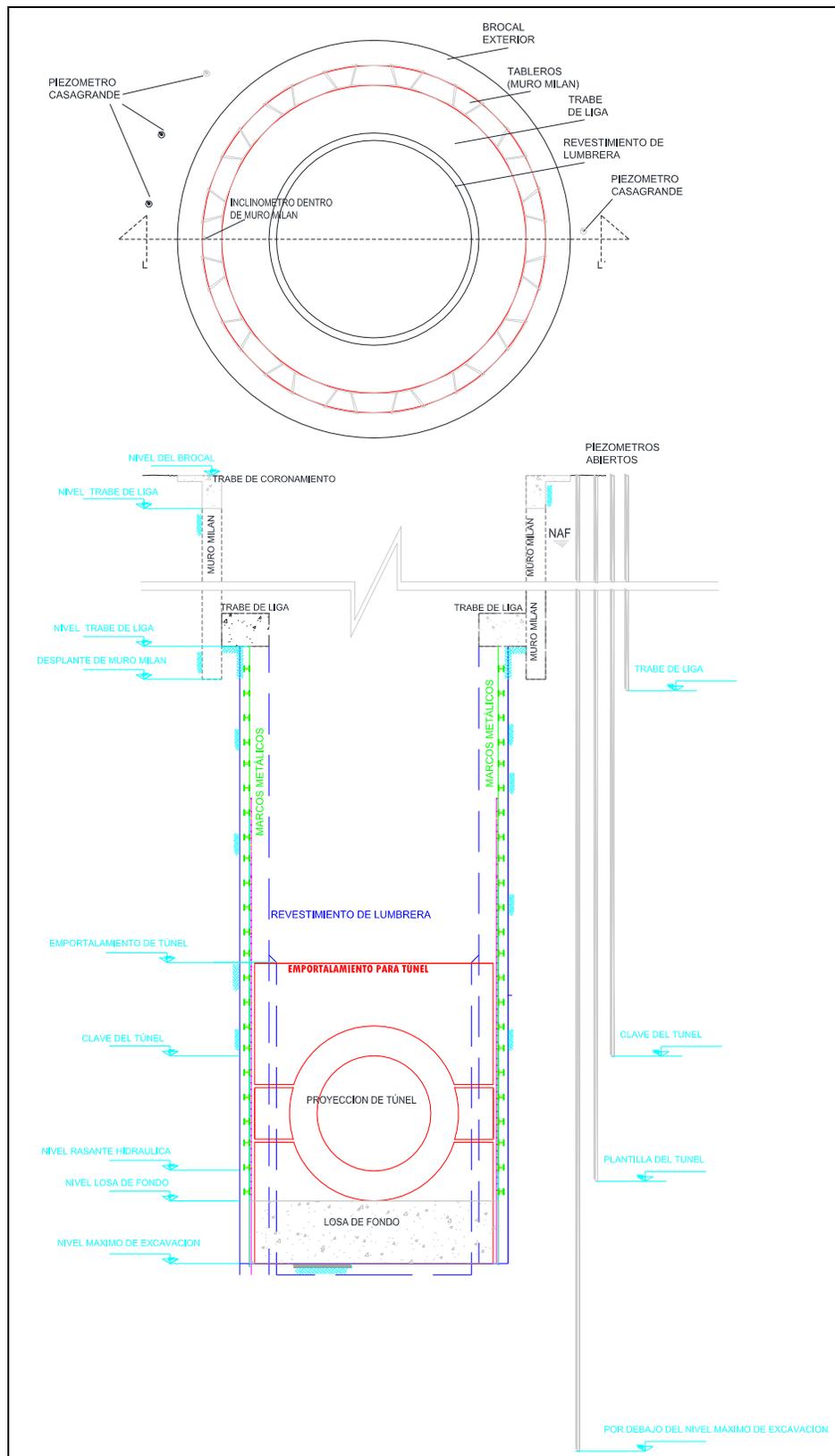
Básicamente consiste en colocar tubería ciega de PVC o acero galvanizado dentro de un barreno ya existente. El primer tramo se coloca de tubería ranurada, y a su vez este tramo se protege con otro tubo ranurado de mayor diámetro, entre el espacio anular se coloca filtro de grava o arena sílica que generalmente se le conoce como “*cámara piezométrica*” (ver figuras 15, 17 y fotografía 05). Después de colocar la cámara piezométrica, se procede a colocar un sello de bentonita para aislar la presión de poro en el filtro con estratos que estén por encima de la tubería ranurada. La longitud de tramo ranurado, diámetros, tamaño de filtro, tipo de tubería, etc., dependen de las características del material (tipo de suelo y/o estrato) en que queden instalados (ver fotografías 06 y 07).

La medición de estos instrumentos consiste en la conexión de un cable graduado, batería, timbre y led, y en sus extremos se colocan dos electros, los cuales al entrar en contacto en una misma masa de agua provoca que se cierre su circuito y ello provoca que haga sonar el timbre (ver figura 18 y fotografía 08).



**FIGURA 15.** Esquema de construcción de bulbo o cámara piezométrica.

Previo al proceso constructivo es vital conocer las presiones del suelo que existen, principalmente a las profundidades de los elementos de la Lumbrera como son: NAF, trabe de liga, clave del túnel y por debajo de la excavación.



**FIGURA 16.** Esquema de instalación de piezómetros abiertos en una Lumbreira; es muy importante conocer las presiones existentes en la clave y cubeta del túnel, por debajo de la losa de fondo y por debajo del NAF.



**FOTOGRAFIA 05.** Construcción de cámara piezométrica (bulbo de 50cm de longitud).



**FIGURA 17.** Cámara piezométrica y/o bulbo de línea <sup>(9)</sup>.



**FOTOGRAFIA 06.** Colocación de cámara piezométrica extendida.



**FOTOGRAFIA 07.** Colocación de sello de bentonita (bolas de bentonita).



**FIGURA 18.** Sondas piezométricas (sondas electroacústicas y visuales) <sup>(10)</sup>.



**FOTOGRAFIA 08.** Monitoreo de piezómetro abierto.

### 4.2.3) Piezómetros eléctricos o de cuerda vibrante

De igual manera que los piezómetros tipo Casagrande, los piezómetros eléctricos sirven para conocer la presión de poro del subsuelo en la profundidad en que se haya instalado.

Los piezómetro de cuerda vibrante (VW) convierten la presión de agua a una señal de frecuencia a través de un diafragma y de una cuerda de acero tensionada. Dichos piezómetros están diseñados de tal manera que una variación en la presión del agua genera un cambio en la tensión de la cuerda. Básicamente el diafragma funciona como una resistencia, el cual, al resentir cambios en su longitud emite señales con distintas frecuencias a través de una bobina magnética (ver figuras 19, 20 y fotografías 09, 10).

Para realizar la medición de estos equipos es necesario contar con consolas “data loggers” compatibles con los piezómetros eléctricos que se hayan instalado (previo a la medición se debe verificar la unidad de frecuencia en que están programadas). Al realizar la medición, generalmente, se obtienen valores en temperatura (°C) y unidades de frecuencia (B), dichos valores se utilizan para ingresarlos en ecuaciones que obedecen al patrón de la calibración que previamente se realiza a cada piezómetro eléctrico (ver fotografía 11). Cada piezómetro tiene su propia ecuación de calibración.

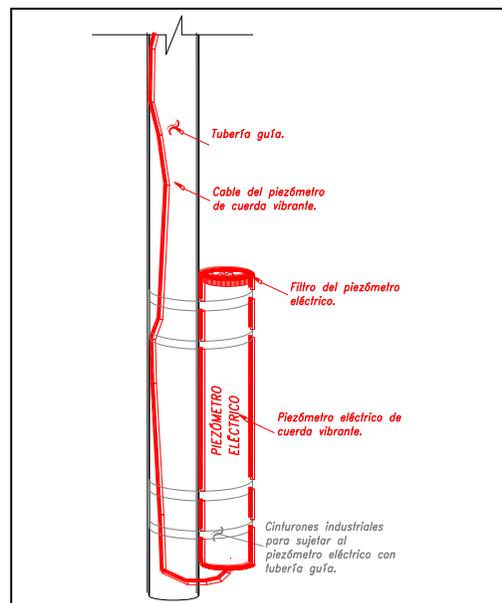


FIGURA 19. Esquema de instalación de un piezómetro eléctrico (este se adosa a una tubería guía).



FIGURA 20. Piezómetros eléctricos y/o de cuerda vibrante <sup>(11)</sup>.



FOTOGRAFIA 09. Instalación de piezómetro eléctrico; se adosa a tubería guía para garantizar la profundidad de instalación.



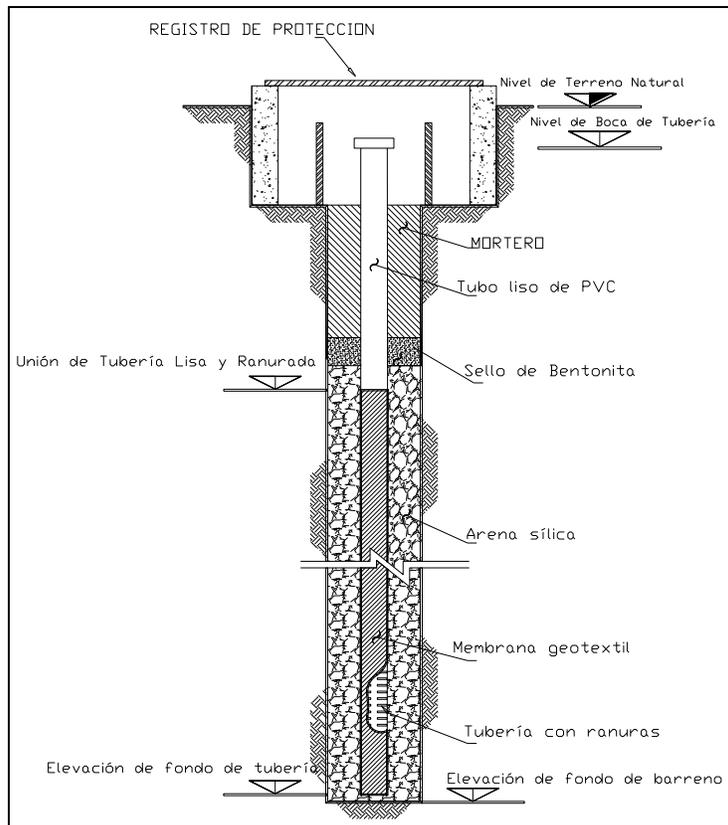
**FOTOGRAFIA 10.** Trabajos de preparación de mezcla agua-cemento-bentonita para la inyección en el espacio anular de la tubería guía y el barreno.



**FOTOGRAFIA 11.** Durante la instalación se toman registros con el Data Logger para verificar su correcto funcionamiento.

#### **4.2.4) Pozos de observación**

Los pozos de observación nos ayudan a conocer la profundidad a la que se encuentra el nivel freático en sitio. Generalmente la mayor parte de la tubería es ranurada lo cual permite comunicar todos los acuíferos (si es que existe más de uno) y acuitados (si es que existe más de uno en el sitio); la principal diferencia con los piezómetros es que en estos últimos se conocen presiones puntuales (quedan instalados en un estrato) y con los pozos de observación la presión obtenida es la presión hidrostática ya que la tubería es mayormente ranurada (ver figura 21 y fotografías 12, 13 y 14).



**FIGURA 21.** Esquema general de instalación de un tubo de observación; la tubería es mayormente ranurada.

De igual manera que los piezómetros tipo Casagrande, para el monitoreo de los tubos de observación se utiliza la sonda piezométrica (sondas sonoras y/o electroacústicas, ver fotografía 15).



**FOTOGRAFIA 12.** Tubería ranurada utilizada para la instalación de un tubo de observación a 145m de profundidad.



**FOTOGRAFIA 13.** Colocación de la tubería ranurada (forrada con filtro geotextil) dentro de un barreno libre a 145m de profundidad.



**FOTOGRAFIA 14.** Colocación de filtro de arena sílica.



**FOTOGRAFIA 15.** Monitoreo de tubo de observación con sonda piezométrica (sonda acústica).

### **4.3) CONSIDERACIONES PARA EL USO, CALIBRACIÓN O VERIFICACIÓN Y MANTENIMIENTO**

#### **4.3.1 Calibración**

La calibración de los instrumentos utilizados es muy importante, pues de los datos arrojados se depende para realizar una interpretación real y oportuna de los trabajos que se estén realizando. Para la regulación de la calibración y vida útil de los instrumentos de geotecnia, en México, no existe una organismo que se haya dado a la tarea para estas actividades; sin embargo en la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) encontramos algunas normas en las que nos podemos apoyar para la calibración, instalación y monitoreo de la instrumentación geotécnica, entre algunas de estas se encuentran:

- ASTM D7299 - 12 Standard Practice for Verifying Performance of a Vertical Inclinator Probe.
- ASTM D6230 - 13 Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclometers.
- ASTM D7764 - 12 Standard Practice for Pre-Installation Acceptance Testing of Vibrating Wire Piezometers.

Además de las normas mencionadas, cada instrumento tiene una ficha de calibración, en la cual se indican los parámetros de funcionamiento, rango de error, estabilidad, fecha de calibración, etc. y generalmente el fabricante del instrumento propone una fecha para una recalibración, sin embargo para llevarla a cabo el instrumento debe ser enviado hasta sus talleres, es decir, debemos de tener considerado un equipo adicional durante el periodo en que se verifique la calibración del primer equipo.

#### 4.3.2 Verificación de calibración de sonda inclinométrica

En todos los tramos del Túnel Emisor Oriente surgieron las dudas acerca de la calibración de los equipos de instrumentación geotécnica. Para mitigar las dudas, y aprovechando que recientemente uno de los tramos había adquirido equipos nuevos, se propuso realizar la verificación de calibración de todos los equipos de medición que se utilizaban en los seis tramos del Túnel Emisor Oriente. La prueba de verificación se describe a continuación:

- Se propuso un lugar en donde no existiera ningún tipo de actividad, ya sea del procedimiento constructivo, bombeo, tránsito vehicular y/o de maquinaria, excavación de túnel, etc. que pudiera interferir con la toma de lecturas.
- Para la verificación de calibración de sonda inclinométrica se tomaron cinco lecturas en un mismo Inclinómetro, y para cada lectura se utilizó una sonda diferente. Al realizar el análisis de los ángulos de inclinación de los datos obtenidos de las mediciones se observa que existe una misma tendencia, por lo que se determina que todas las sondas utilizadas están en perfecto estado en su calibración (ver figura 22).

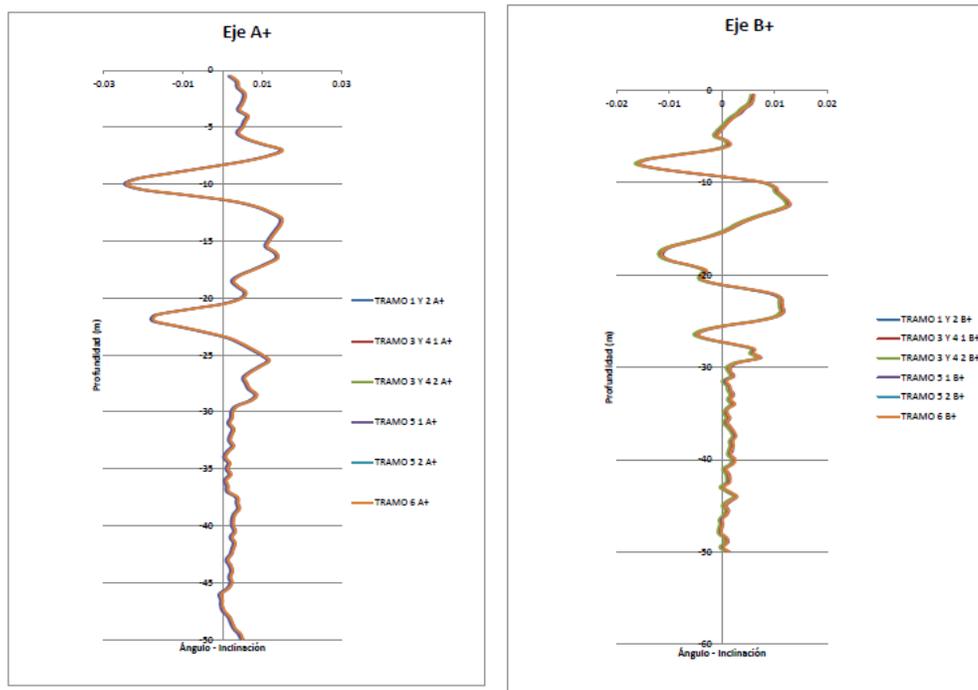


FIGURA 22. Graficas de lecturas de ángulos de inclinación con 5 sondas diferentes para validar su calibración <sup>(12)</sup>.

- Debo mencionar que con esta prueba pudimos verificar exclusivamente la calibración de las sondas inclinométricas y no la del cable utilizado. Para verificar que el cable no presente elongación y/o las muescas que están a cada 50 cm no se hayan desplazado se puede utilizar una cinta métrica de metal y/o apoyo de equipo de topografía.

#### 4.3.3) Verificación de calibración de consola de cuerda vibrante

- Para la verificación de calibración de equipos de medición de instrumentos de cuerda vibrante (wireline) se realizaron cinco mediciones a un mismo piezómetro eléctrico, utilizando cinco consolas distintas. Al realizar

la comparativa de las lecturas registradas se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro de un mismo rango y/o no hay discrepancia en ellos (ver figura 23).

LUGAR: LUMBRERA 15 FECHA: 21 DE JUNIO DEL 2013

VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE AUSCULTACIÓN

DATALOGGERS PARA CUERDA VIBRANTE					
NO. DE SERIE	PROFUNDIDAD DE INSTALACIÓN (M)	UNIDADES B ( $\text{Hz}^2 \times 10^{-3}$ )	TEMPERATURA °C	TRAMO	MARCA
29745	102	6428.1	19.8	6	SLOPE INDICATOR
330337	102	Utilizando en bovelas		1 y 2	SLOPE INDICATOR
30570	102	6428.5	19.4	1 y 2	SLOPE INDICATOR
VR 0390	102	6429.7	19.8	1 y 2	RST
VR 0650	102	6429.6	19.7	5	RST
VR 0492	102	6429.6	19.7	5	RST
1031727	102	En Reparación		3 y 4	GEOCON
41455	102	6428.3	19.9	3 y 4	SLOPE INDICATOR

*Handwritten notes:*  
 - Left side: "Carpas Fricción 21/06/13"  
 - Right side: "José Anselmo Pérez Rojas"  
 - Bottom: Multiple signatures and dates including "Kaka Bustillos Tramo 6 Lyisa", "Raúl Hdez. Glez. 21/06/13", "Juan D. Valencia COMISSA 21/06/13", "José Luis Castillo G.", "Edwardo Vegeza R.", "R. V. Vega 21/06/13", "J.M. Yomade 21/06/13".

FIGURA 23. Registro de lectura en consolas de lecturas de instrumentos de cuerda vibrante para validar su correcta calibración (12).

- Es muy importante que previo a realizar las mediciones se verifiquen las unidades en las que se deben de medir, dichas unidades se indican en las fichas de calibración del instrumento a medir.

#### 4.3.4) Consideraciones de uso y mantenimiento

Las consideraciones que se deben de tener para el uso, operación y mantenimiento son las que se indican por los fabricantes de los equipos. La experiencia en campo nos sugiere aplicar las recomendaciones que se indican en las tablas 01 y 02 que a continuación se muestran:

INSTRUMENTO	RECOMENDACIONES PARA SU USO Y MANTENIMIENTO
Inclinómetro en Lumbrera, piezómetro eléctrico, piezómetro abierto, referencias superficiales.	Construcción de registro de protección. Colocar tapón en boca de tubería. Señalamiento y confinamiento al realizar la medición. Colocar placa con nomenclatura. Limpieza ocasional (retiro de acumulación de agua y polvo).

TABLA 01. Recomendaciones generales para el correcto uso y mantenimiento de instrumentación de Lumbrera.

EQUIPO DE MEDICIÓN	RECOMENDACIONES PARA SU USO Y MANTENIMIENTO
<p>Probeta inclinométrica.</p>	<p>Limpieza después de cada uso. Guardar en estuche de protección. Almacenar en lugar seco, fuera de la intemperie y sin perturbaciones (principalmente ruido y vibraciones). Lubricación de rodamientos de manera ocasional. Limpieza con aire al cabezal de la sonda (previo y después de utilizarla).</p>
<p>Cable para sonda inclinométrica.</p>	<p>Limpieza después de cada uso. Guardar en estuche de protección. Almacenar en lugar fuera de la intemperie. Retirar baterías cuando no esté en uso. Realizar el descenso del cable de forma lenta y vertical, procurando no tocar las muescas.</p>
<p>Consola para instrumentos de cuerda vibrante.</p>	<p>Limpieza después de cada uso. Almacenar en lugar fuera de la intemperie. Retirar baterías cuando no esté en uso.</p>

**TABLA 02.** Recomendaciones generales para el correcto uso de instrumentos de medición.

## 5. PROYECTO TÚNEL EMISOR ORIENTE

### 5.1) DATOS DEL PROYECTO

Como ya se mencionó antes, el Túnel Emisor Oriente tendrá una longitud de 62 Km aprox. y a lo largo de su recorrido se utilizarán para su construcción, operación y mantenimiento, 25 *lumbreras* de profundidad variable que van desde los 30 m hasta los 150 m. El inicio del TEO es la lumbrera L-00, la cual corresponde a la lumbrera 2 del Interceptor Río de los Remedios del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México. Posteriormente correrá casi paralelo (margen izquierda) al Gran Canal atravesando los municipios de Ecatepec de Morelos, Coacalco y Tultepec, pasará al poniente de la Laguna de Zumpango y atravesará los municipios de Teoloyucan, Huehuetoca, Tlaltepoxco, Melchor Ocampo (en esta zona pasara por la margen derecha del Tajo de Nochistongo), descargará sus aguas en el municipio de Atotonilco de Tula, Estado de Hidalgo, cerca del portal de salida del Túnel Emisor Central, para que ambas corrientes sean conducidas a la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco que está próxima a concluirse.

El caudal que conducirá el túnel será del orden de 150 m<sup>3</sup>/s de, tendrá un diámetro de 7 m, durante la época de lluvias trabajará de manera simultánea al Túnel Central y durante los meses de sequía sus funciones se alternarán para brindarle mantenimiento necesario a ambas obras. Para la construcción de esta obra se invirtieron recursos provenientes del Presupuesto de Egresos de la Federación como del Fideicomiso de 1928, con una inversión que va desde los 19 mil 500 millones de pesos. Para agilizar la construcción se dividió en 6 tramos, los cuales se muestran en la Figura 24.

### 5.2) UBICACIÓN DE LAS LUMBRERAS

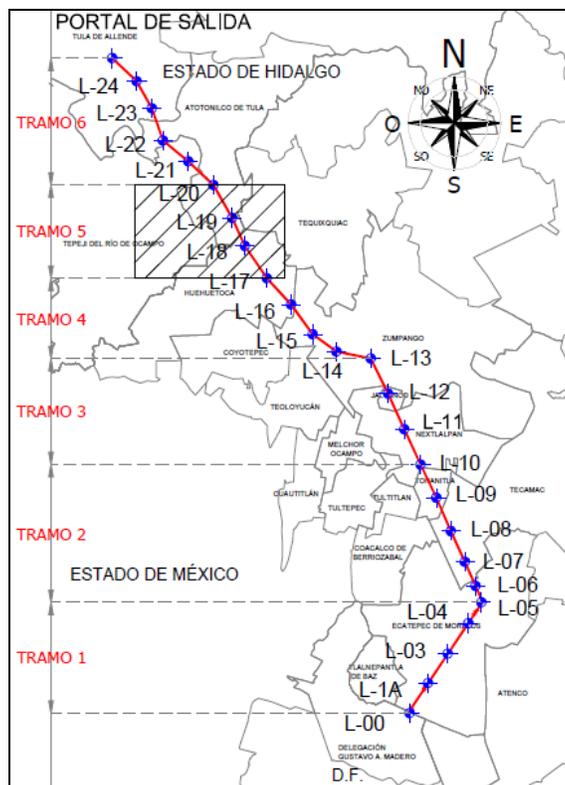


FIGURA 24. Esquema general de ubicación del Túnel Emisor Oriente y sus Lumbreras <sup>(13)</sup>

### 5.2.1) Geología general del TEO

De acuerdo a los estudio de factibilidad, el *TEO* tendrá en su recorrido varios tipos de suelos, en el inicio se encuentra en una zona de arcillas blandas con alto contenido de agua. El Tramo 2 básicamente está construido en suelos de depósitos lacustres arcillo arenoso con intercalaciones de suelos conformados por arenas aluviales y gravas poco permeables. El Tramo 3 está situado en suelos de depósitos lacustres arcillo arenoso con varias intercalaciones de tobas basálticas. El Tramo 4 está situado en suelos de depósitos lacustres arcillo arenoso con intercalaciones de suelos conformados por cenizas volcánicas, toba basáltica, escombros de origen volcánico y tobas pumíticas medianamente permeables. **El tramo 5** se sitúa entre tobas pumíticas medianamente permeables intercaladas con conglomerados y fragmentos de roca, conglomerados con depósitos aluviales de baja permeabilidad y la mayor parte es de arcillas lacustres consolidadas (Taximay). El tramo 6 se encuentra en intercalaciones de arcillas lacustres consolidadas (Taximay) intercalados con abanicos aluviales y tobas pumíticas y con conglomerados y fragmentos de roca; ver figura 25.

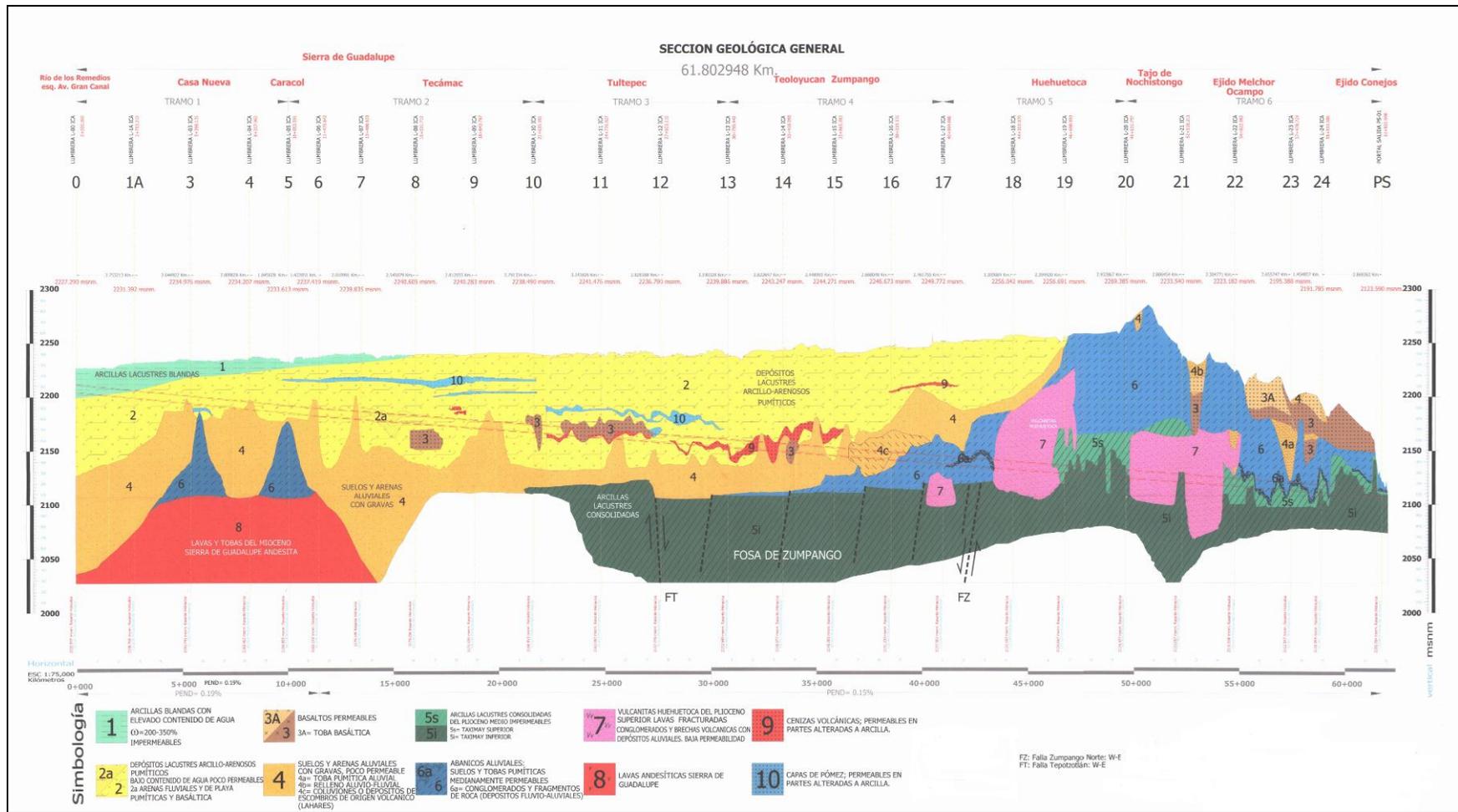


FIGURA 25. Esquema general de geología por el que atraviesa el Túnel Emisor Oriente (14).

### 5.3) LUMBRERA No. L-18, L-19 Y L-20

#### 5.3.1) Características geométricas

Las Lumbreras L-18, L-19 y L-20 se construirán para varios fines, tales como: ingreso de materiales y salida de material de rezaga (producto de la excavación del túnel), pero la lumbrera L-20 se diseñó para realizar otra actividad fundamental para la construcción del TEO: para el ensamble de la máquina tuneladora. Los métodos constructivos utilizados para la construcción de las 3 Lumbreras antes mencionadas son dos: métodos: convencional y método de Muro Milán (ver principales características de las Lumbreras L-18, L19 y L-20 en tabla 03 y características del suelo en figura 26).

LUMBRERA	PROFUNDIDAD DE EXCAVACION (m)	PROFUNDIDAD EFECTIVA (LOSA DE FONDO (m).	PROFUNDIDAD TRABE DE LIGA (m)	DIAMETRO EFECTIVO (m).	CARACTERISTICAS DE OPERACIÓN
L-18	128	126	80	12	Entrada para trabajadores, materiales y maquinaria. Retiro de rezaga
L-19	134	132	67	12	Entrada para personal y maquinaria. Retiro de rezaga
L-20	155	153	120	16	Ensamble de maquina (tuneladora), entrada de trabajadores y materiales. Retiro rezaga

Tabla 03. Características y dimensiones principales de las lumbreras L-18, L-19 y L-20 del TEO.

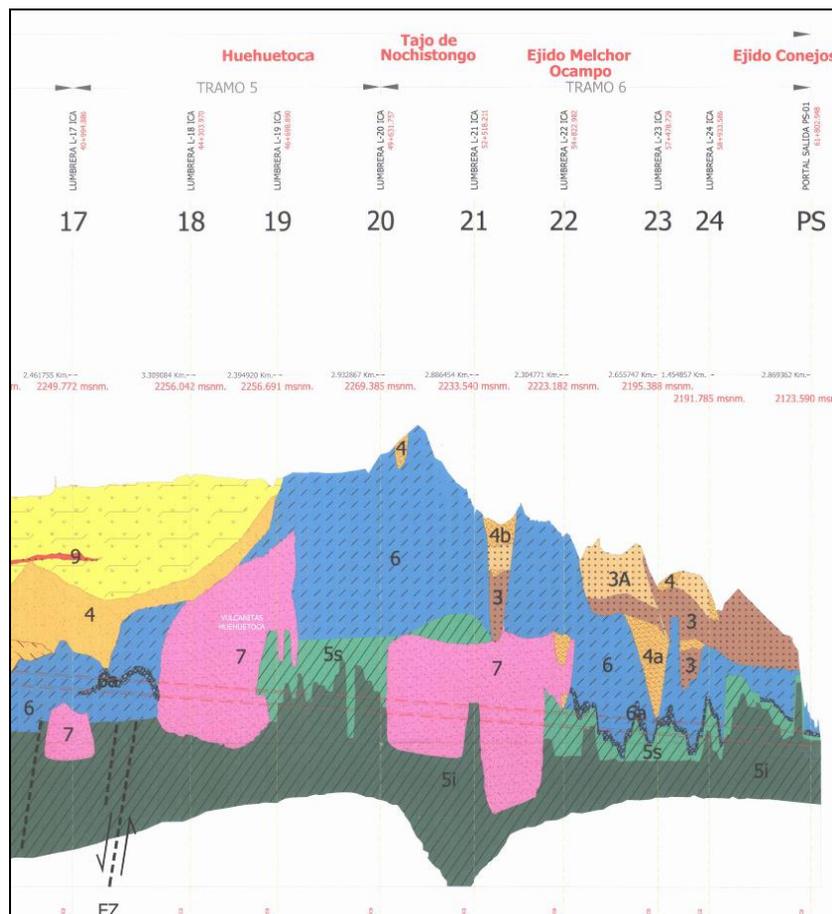


FIGURA 26. Perfil geotecnico del tramo 05 del TEO (14).

### 5.3.2) Perfil estratigráfico de la zona en estudio

En general el subsuelo en donde se encuentra ubicada la Lumbra L-18 está conformado por intercalaciones de arcillas y limos arenosos y arenas hasta los 65 m. En dicha profundidad se encuentra un estrato de toba. A partir de los 70 m se tienen intercalaciones de arenas limosas y limos arenosos. A los 100 m y 110 m se encuentran algunos estratos de boleos (ver figuras 27, 28 y 29).

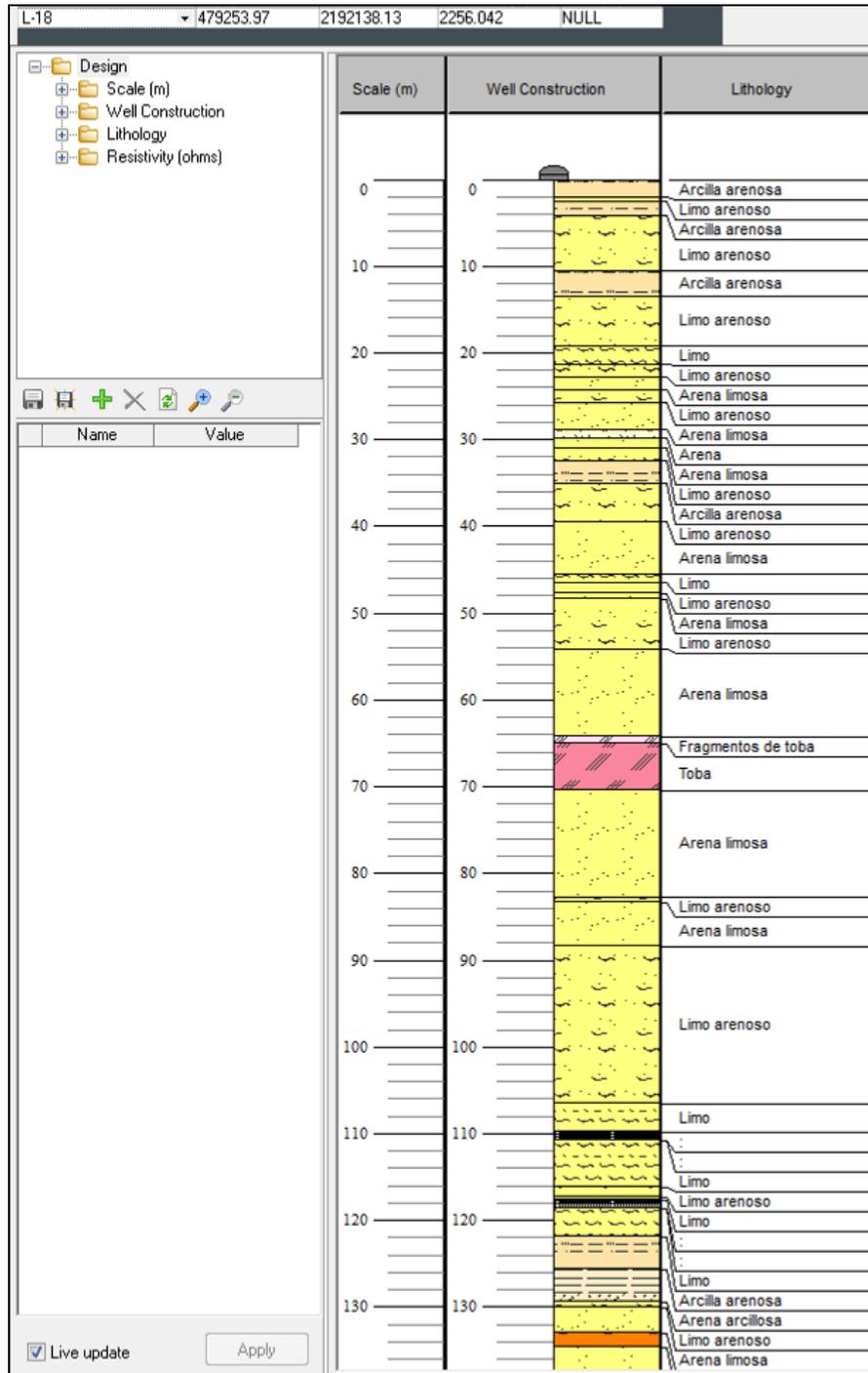


FIGURA 27. Perfil litológico del suelo de la Lumbra L-18 del TEO <sup>(15)</sup>.

En la parte somera de la L-19 se tienen varias intercalaciones de arenas limosas con arcillas y limos arenosos. A los 85 m de profundidad se encuentra un estrato de boleos de basalto y a partir de esta profundidad se encuentra grandes estratos de lutitas (Taximay).

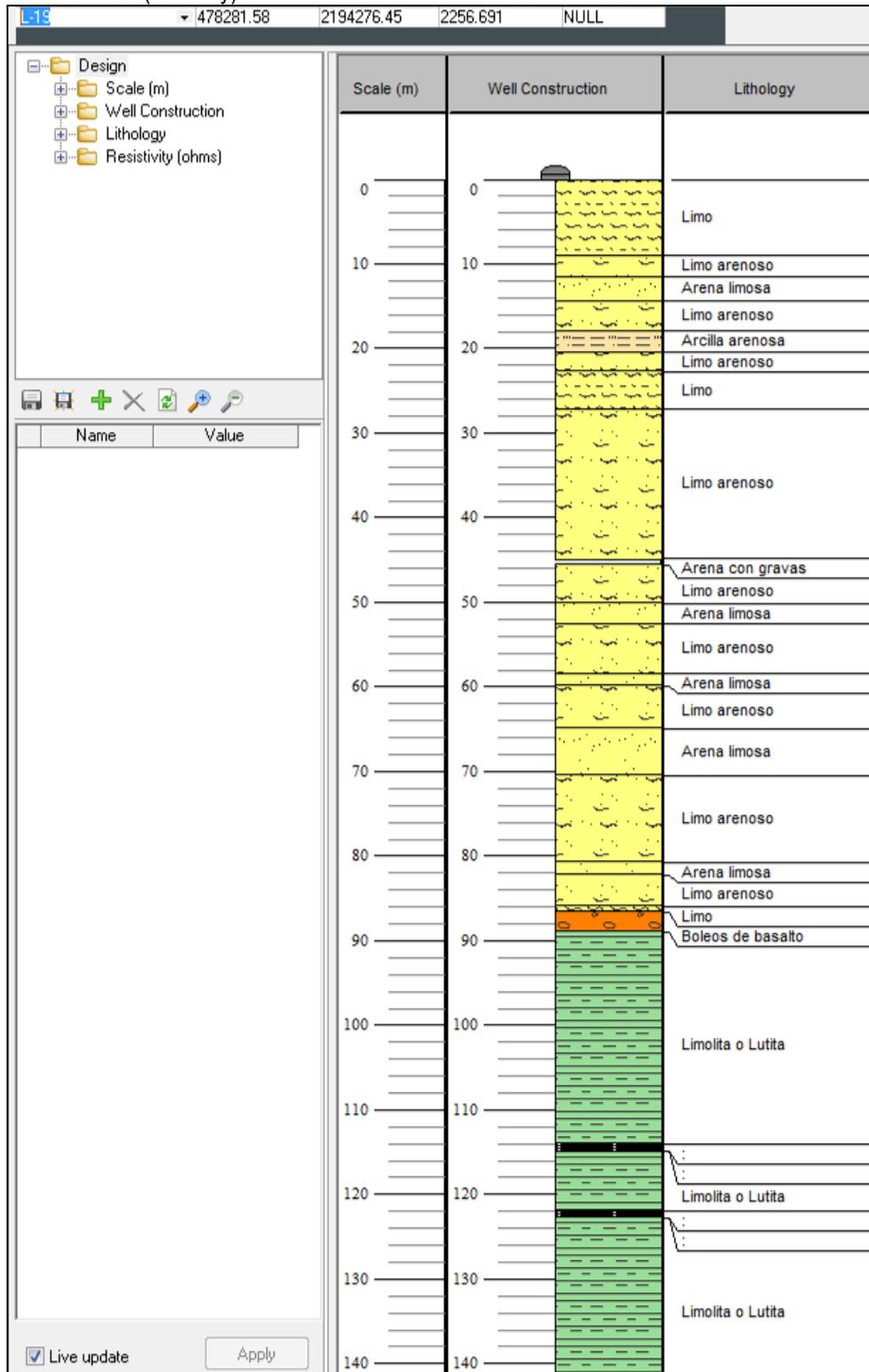


FIGURA 28. Perfil litológico del suelo de la Lumbreira L-19 del TEO (15).

En la L-20 se inicia con intercalaciones de Limos arenosos y arena limosa. A partir de los 85 m y hasta los 113 m se tienen algunas intercalaciones de boleos de basalto y arcillas arenosas. A partir de los 113 m se presentan grandes formaciones de lutitas y/o arcillas lacustres consolidadas (Taximay).

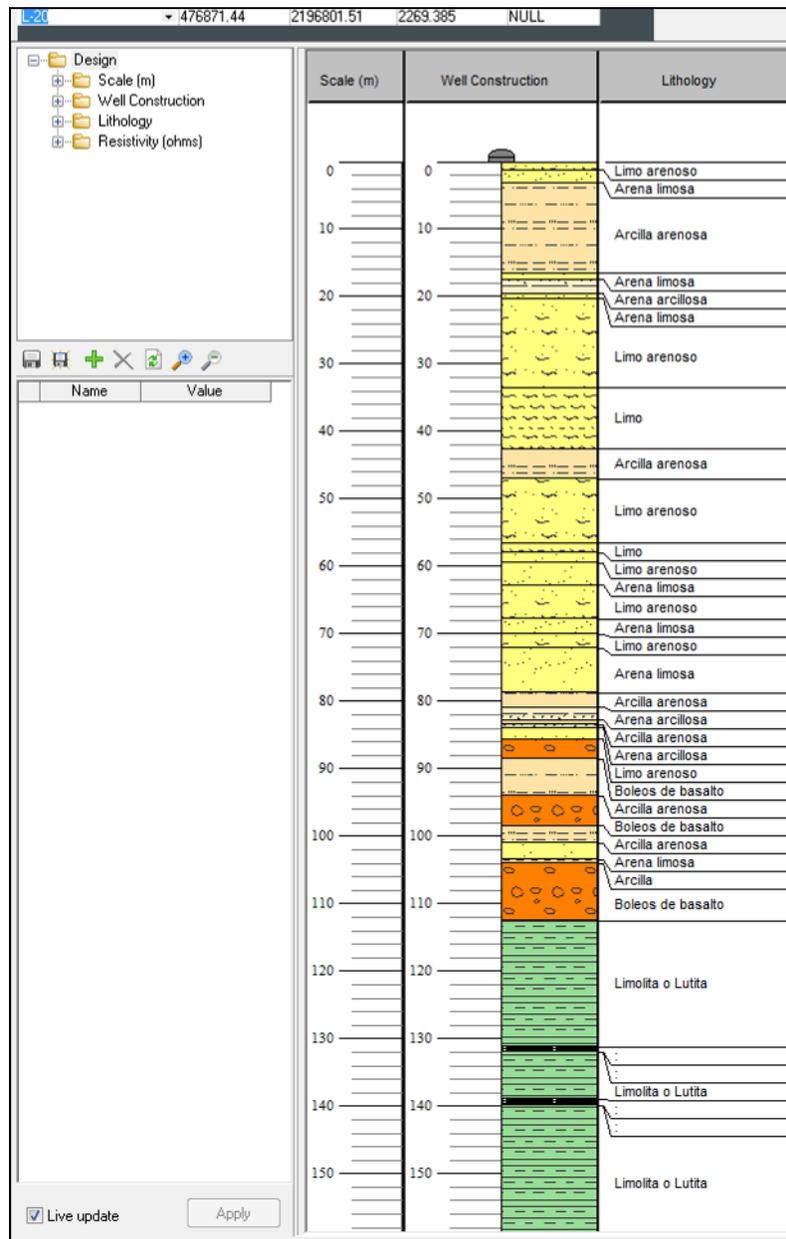


FIGURA 29. Perfil litológico del suelo de la Lumbrera L-20 del TEO <sup>(15)</sup>.

### 5.3.3) Proceso constructivo

Para la construcción de la Lumbrera, fue primordial conocer las características geohidrológicas, geotécnicas y topográficas, ya que básicamente estas características determinarían el diseño de la Lumbrera, proceso constructivo, instalaciones adicionales, etc. Dado que las características del suelo para la Lumbrera L-18, L-19 y L-20 eran muy similares, su proceso constructivo fue muy similar; en una primera etapa se construyeron con Muro Milán, y en la segunda etapa se construyeron con método convencional para su posterior revestimiento definitivo (ver figura 30).

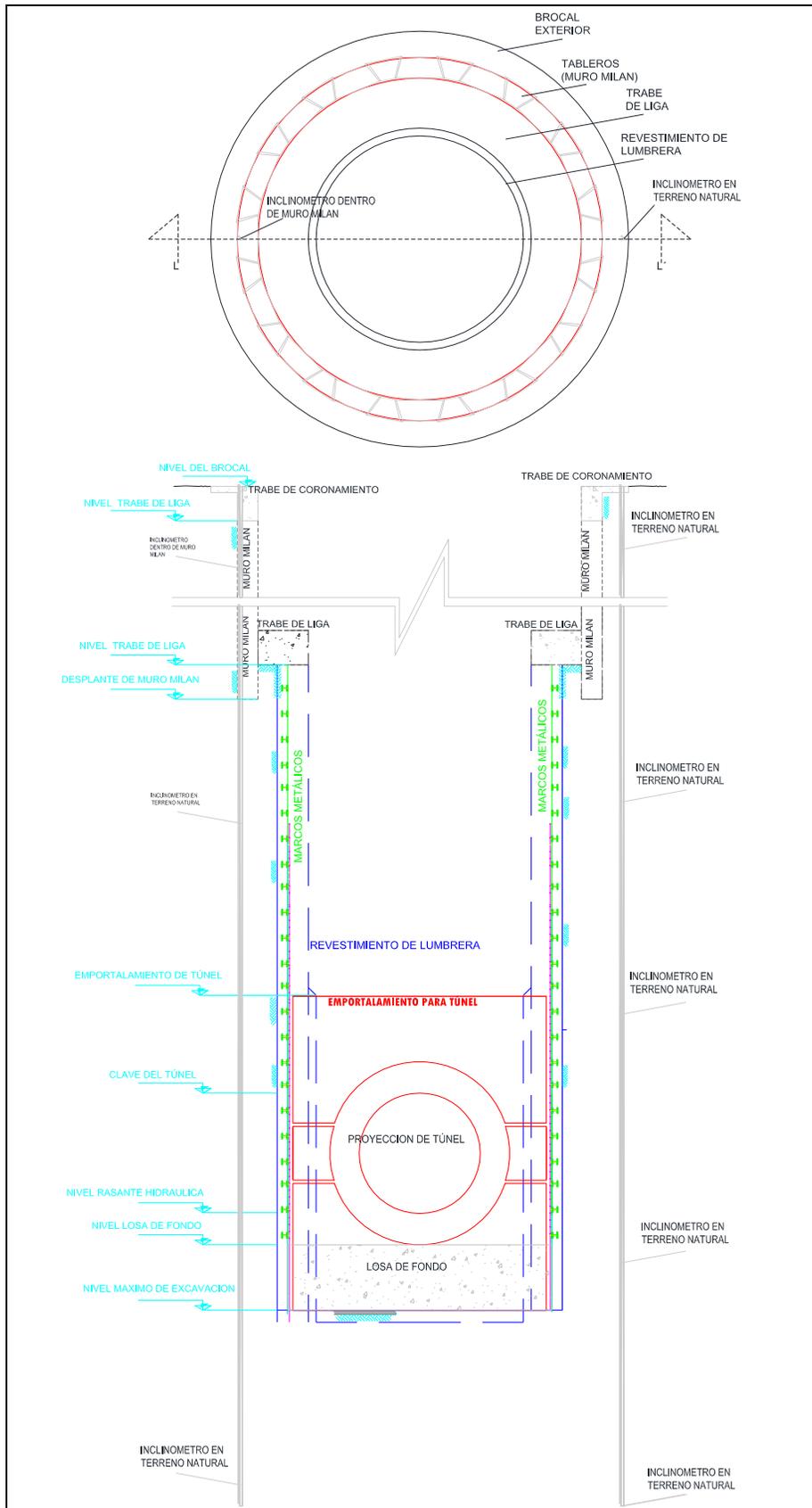


Figura 30. Principales elementos de Lumbreras L18, L-19 y L-20 del TEO; construcción con dos métodos: muro Milán y método convencional.

#### **5.3.4) Descripción general del proceso constructivo de la Lumbra L-20**

Como ya se mencionó, para la construcción de la Lumbra L-20 se utilizaron dos métodos de construcción: el método de Muro Milán y el método convencional. Se elige describir, brevemente, el proceso de la L-20 ya que de las tres Lumbra en estudio esta tiene mayor profundidad; sin embargo cada una de estas tuvo sus complicaciones.

Para la parte del método de muro Milán se utilizó una máquina excavadora vertical llamada “Hidrofresa”; la cual excava zanjas verticales (tableros) para posteriormente colocar el armado de acero y como última etapa se realizó la colocación del concreto. Los tableros se construyen de forma radial hasta dejar confinado la parte central (núcleo de la Lumbra). Después de construir todos los tableros que formaran el Muro Milán, se procede a la construcción de la trabe de coronamiento, ésta se encarga de ligar estructuralmente a todos los paneles del muro Milán en la parte superior (ver fotografías 16 – 24).

El segundo método constructivo que se utilizó, es el método convencional, el cual consiste en colocar un muro de acompañamiento formado por concreto estructural y por marcos metálicos horizontales.

Para unir, estructuralmente los dos métodos (muro Milán y convencional) se construye una “trabe de liga” la cual es un elemento de concreto reforzado (ver fotografías 25 – 29).

Alcanzada la profundidad máxima de excavación y para contener los efectos de supresión (falla de fondo) en el fondo de la Lumbra se construye la losa de fondo (ver fotografías 30 – 32).

Como última etapa del proceso constructivo de la Lumbra se realiza el revestimiento definitivo (para éste revestimiento se utiliza una cimbra deslizante; ver fotografías 33 – 36).

Paralelamente a la construcción de la Lumbra, y como actividades complementarias, se realizan distintas instalaciones como: instalación de ventilación, electricidad, líneas de aire, agua, concreto, escaleras y/o ascensor, equipos de bombeo, y así mismo la instalación de la instrumentación geotécnica, y como ya se mencionó anteriormente, esta nos sirve para cuantificar con precisión ciertos parámetros de comportamiento estructural, monitorear la estabilización de la lumbra y supervisar los posibles cambios o reducir la posibilidad de cualquier mecanismo de falla del suelo.

A continuación se realiza un breve descripción grafica de las etapas de construcción (ver fotografías 16 – 36).



**FOTOGRAFIA 16.** Construcción de brocal exterior, mejoramiento del suelo del brocal interior para evitar asentamientos del suelo producidos por el peso de la excavadora “Hidrofresa”; con ello se pretende garantizar la verticalidad de los tableros.



**FOTOGRAFIA 17.** Ensamble del equipo de perforación continúa para Muros Milán “Hidrofresa”.



**FOTOGRAFIA 18.** Equipo auxiliar de "Hidrofresa": planta desarenadora, planta mezcladora, separador de finos, decantadores y planta de floculación.



**FOTOGRAFIA 19.** Durante la construcción del Muro Milán se realizaron trabajos simultáneos: perforación con equipo guiado y colocación de acero de refuerzo de los paneles y colocación de concreto con tubería tremie.



**FOTOGRAFIA 20.** Colocación de acero de refuerzo para el Muro Milán dentro de la perforación



**FOTOGRAFIA 21.** Demolición de núcleo interior: se da inicio a la excavación de núcleo de la Lumbrera; al fondo de la imagen se observa el equipo de perforación para la instalación de un inclinómetro dentro del Muro Milán.



**FOTOGRAFIA 22.** Excavación del núcleo de la Lumbrera y limpieza de los tableros del Muro Milán.



**FOTOGRAFIA 23.** Durante los trabajos de excavación del núcleo de presentaron algunos lentes de agua, los cuales fueron canalizados hacia un cárcamo para el bombeo de achique.



**FOTOGRAFIA 24.** Instalación de Inclínómetros en Muro Milán, para ello fue necesario colocar una plataforma para trabajar con mayor seguridad.



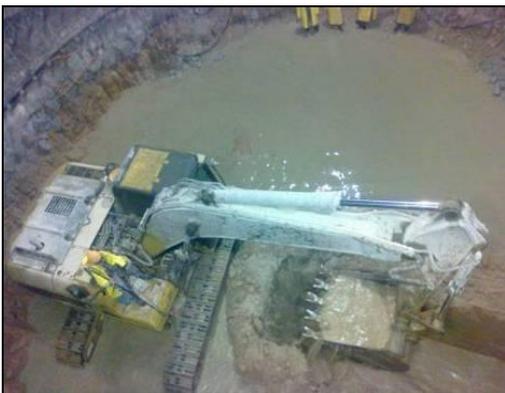
**FOTOGRAFIA 25.** Escarificado de tableros previo al habilitado y armado de acero de refuerzo para la trabe de liga.



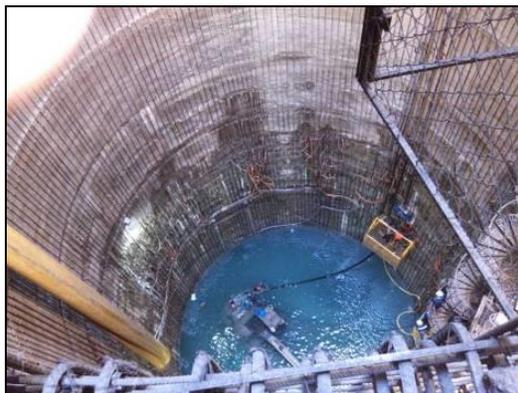
**FOTOGRAFIA 26.** Construcción de la trabe de liga; unión estructural del Muro Milán con método Convencional.



**FOTOGRAFIA 27.** Construcción de la Lumbraera bajo método convencional; en esta se aprecia la colocación de Marcos de acero, recubrimiento primario con concreto lanzado y preparaciones para el armado de acero del revestimiento definitivo.



**FOTOGRAFIA 28.** Conforme se avanza en la construcción de la Lumbraera se presentan importantes filtraciones de agua hacia el interior; en la imagen se observa la construcción del cárcamo para bombeo de achique.



**FOTOGRAFIA 29.** Durante la excavación del núcleo central la instrumentación nos indicaba las presiones que se debían abatir, sin embargo en la fotografía se muestra el resultado de la falla de los módulos de bombeo.



**FOTOGRAFIA 30.** Habilitado y armado de acero de refuerzo para la losa de fondo y el revestimiento definitivo de la Lumbraera.



**FOTOGRAFIA 31.** Maniobras de descenso de la estructura metálica para el emportalamiento de la entrada del túnel.



**FOTOGRAFIA 32.** Panorama de la Lumbraera L-20 al término del armado de acero de refuerzo de losa de fondo, colocación de estructura de emportalamiento en la entrada de túnel, revestimiento con acero de refuerzo en las paredes de la Lumbraera.



**FOTOGRAFIA 33.** Colocación de cimbra deslizante en el fondo de la Lumbra, colocación de cimbra en portales del túnel previo a la colocación de concreto.



**FOTOGRAFIA 34.** Trabajos de colado del revestimiento definitivo de la Lumbra con el método de cimbra deslizante.



**FOTOGRAFIA 35.** Panorama general de la Lumbra al término de su construcción; en la figura se aprecia la colocación de instalaciones auxiliares.



**FOTOGRAFIA 36.** Demolición de concreto y retiro de marcos metálicos en portal de entrada. Inicia construcción de Túnel.

## 6. INSTRUMENTACIÓN INSTALADA EN LA LUMBRERA L-18, L-19 Y L-20 DEL TEO

### 6.1.) TOPOGRÁFICA

#### 6.1.1) Referencias superficiales

La instalación de las referencias superficiales en forma radial, con ello se pretende conocer el comportamiento del suelo (desplazamientos, asentamientos y/o abundamientos) por las actividades de construcción de la Lumbreira; en la figura 31 se indican las Referencias que se instalaron en la Lumbreira L-18 (REFSL-01 a REFSL-20). Para el caso de las Lumbreiras L-19 y L-20 se instalaron el mismo número de referencias y en la misma posición respecto al eje del túnel, sin embargo y para fines didácticos decidí utilizar como ejemplo el caso particular de la L-18, ya que fue en donde se presentaron mayores asentamientos.

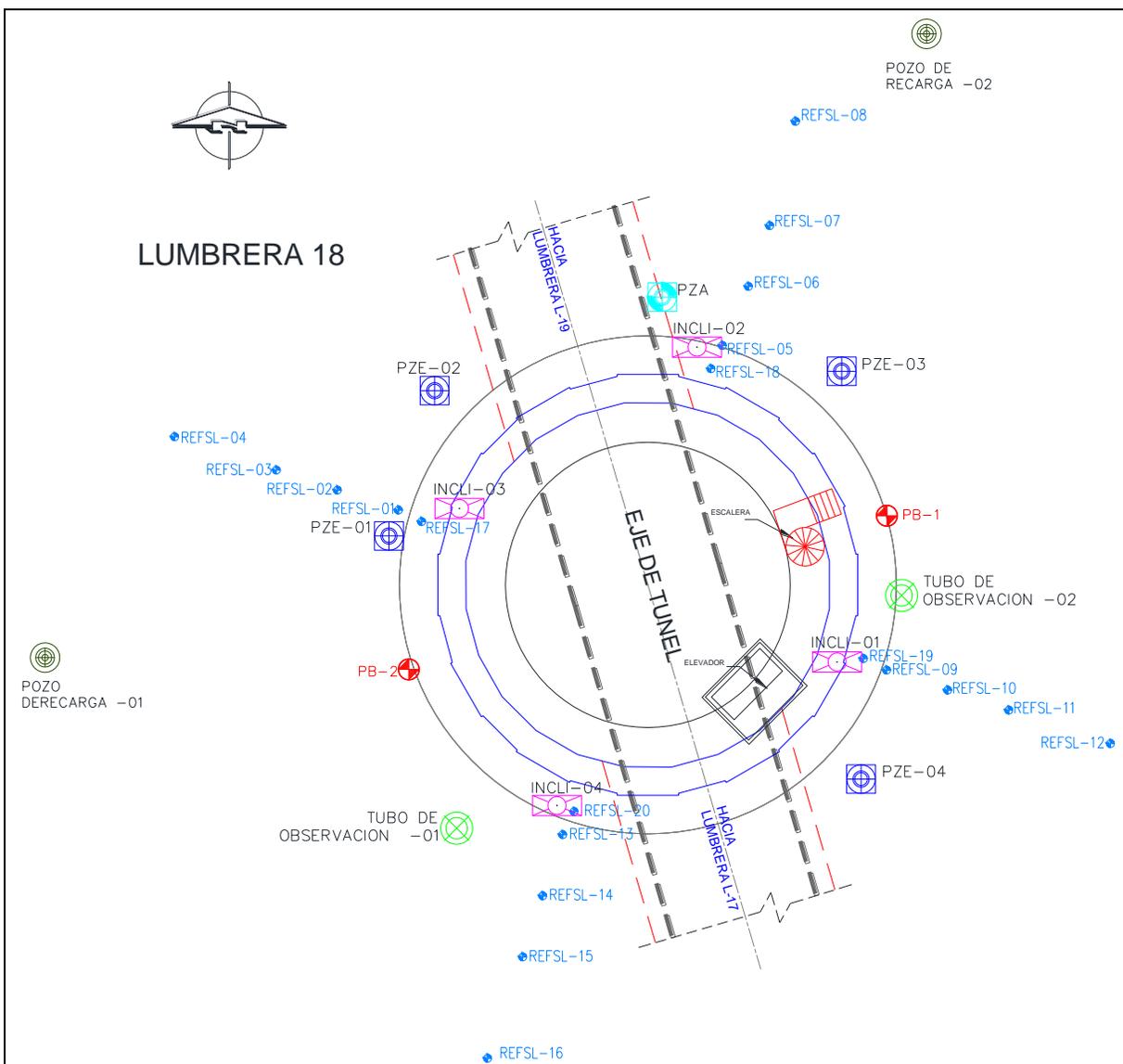


FIGURA 31. Esquema general de colocación de las referencias superficiales; se colocaron a diferentes distancias radiales: 7 m, 9 m, 11 m, 13 m, 15 m y 17 m respecto al centro de la lumbreira y tienen la nomenclatura REFSL-01 al 20.

## 6.2) GEOTÉCNIA

### 6.2.1) Piezómetros

El objetivo principal de la instalación de piezómetros abiertos, piezómetros eléctricos y pozos de observación en la periferia de la Lumbreira es conocer la evolución de las condiciones hidráulicas del subsuelo durante la etapa de excavación del núcleo y de la construcción de la misma, además de conocer los abatimientos reales por la influencia del bombeo (si es que es necesario el bombeo con pozos perimetrales y/o de achique). Para el estudio de este instrumento se utilizaron los datos arrojados por los piezómetros instalados en la Lumbreira L-20, que de igual forma a las referencias superficiales, este es el caso más representativo de las tres Lumbreiras en estudio; el sembrado y características del suelo en donde se instalaron los piezómetros se indican en la figuras 32 y 33.

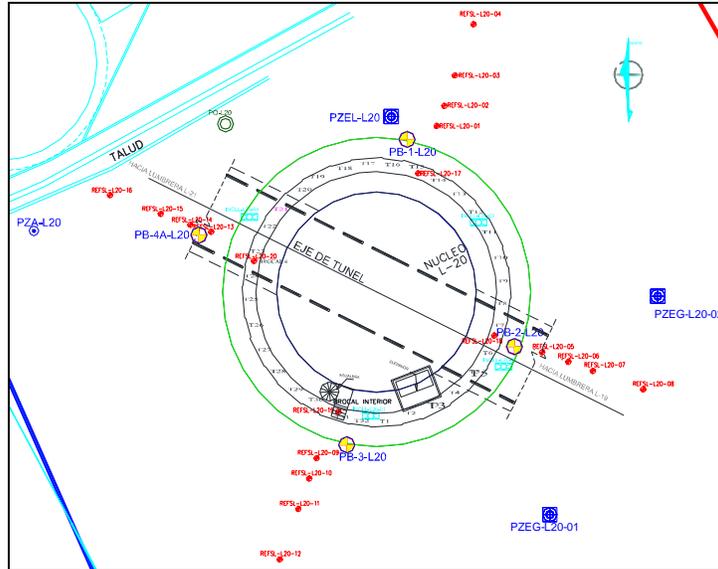


FIGURA 32. Croquis de ubicación de estación piezométrica de la Lumbreira L-20 del TEO.

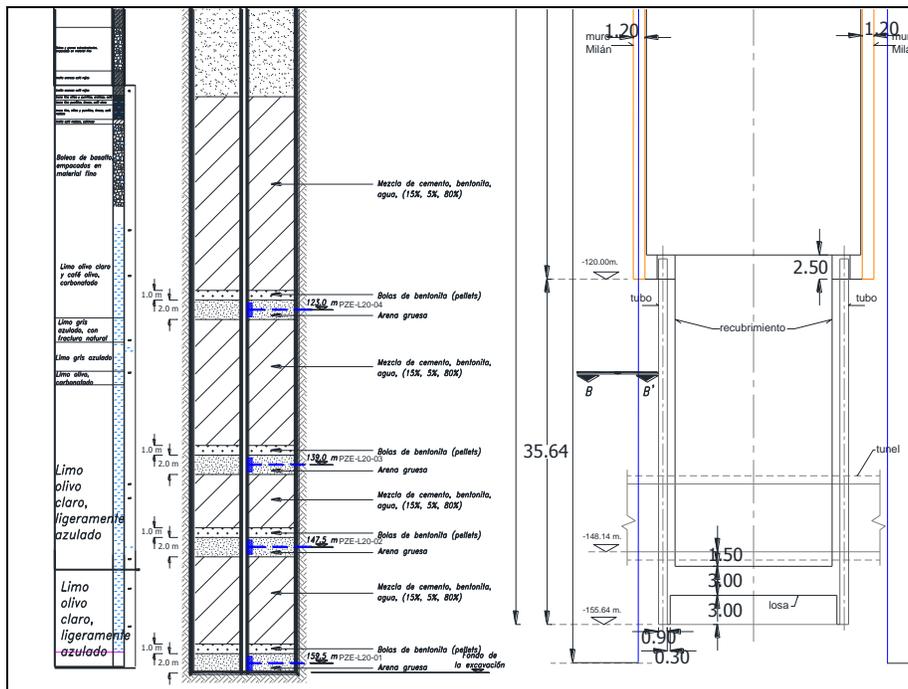


FIGURA 33. Esquema de instalación de piezómetros eléctricos de la Lumbreira L-20 del TEO <sup>(16)</sup>.

## 6.2.2) Inclinómetros

Los Inclinómetros verticales instalados en la periferia de una Lumbrera nos permiten conocer los movimientos y desplazamientos que pudiesen presentar durante las distintas etapas de construcción y/o después de presentarse fenómenos naturales como los sismos y así determinar si existe algún indicio de algún tipo de mecanismo de falla del suelo o de la estructura y con ello poder tomar las medidas preventivas y/o correctivas necesarias. Para ejemplificar las mediciones de Inclinómetros más representativas se utilizaron dos casos de la Lumbrera L-20, esto nos permitió conocer los desplazamientos del muro Milán y suelo natural durante el proceso constructivo de la Lumbrera; además estos datos se pudieron cotejar con los desplazamientos esperados de acuerdo a proyecto (ver figura 34).

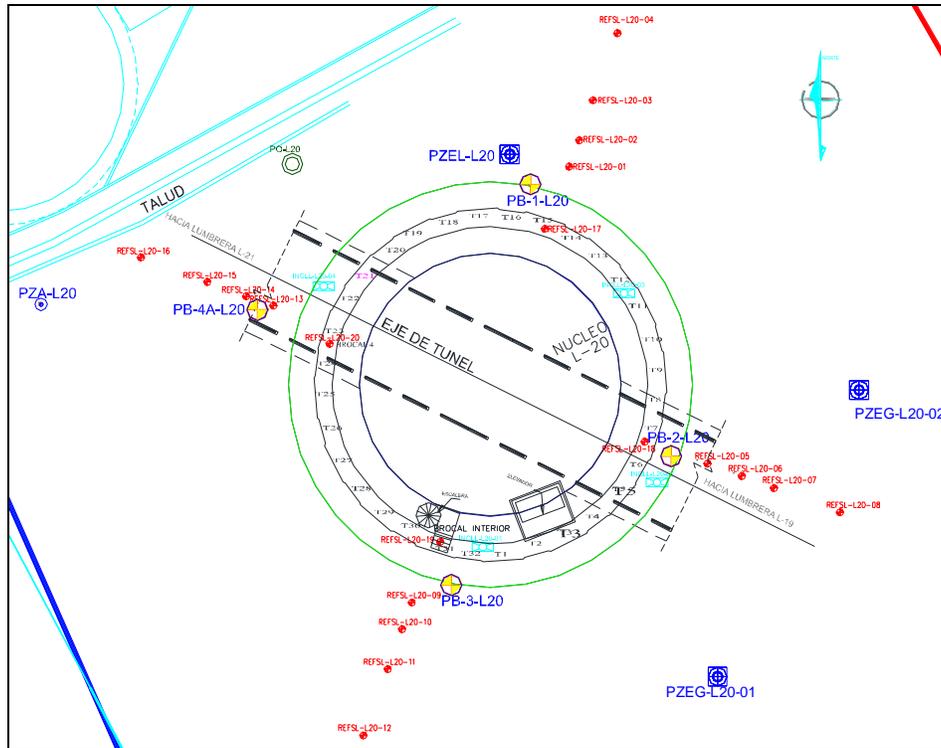


FIGURA 34. Croquis de ubicación de Inclinómetros instalados en la Lumbrera L-20 del TEO.

### 6.2.2.1) Principales mecanismos de falla para Lumbrera

- 1.- Falla general por cortante en las paredes de la excavación (se generan desplazamientos horizontales y verticales).
- 2.- Falla local de las paredes de la excavación.
- 3.- Falla por cortante en el fondo.
- 4.- Falla del fondo por subpresión.
- 5.- Falla por flotación (emergimiento de la Lumbrera terminada).

### 6.2.2.1.1) Falla local en las paredes de la excavación

Este tipo de falla se presenta cuando al aplicar una carga en el suelo aledaño a la Lumbreira se presentan fisuras, agrietamientos en las paredes de la excavación (representado en figura 35).

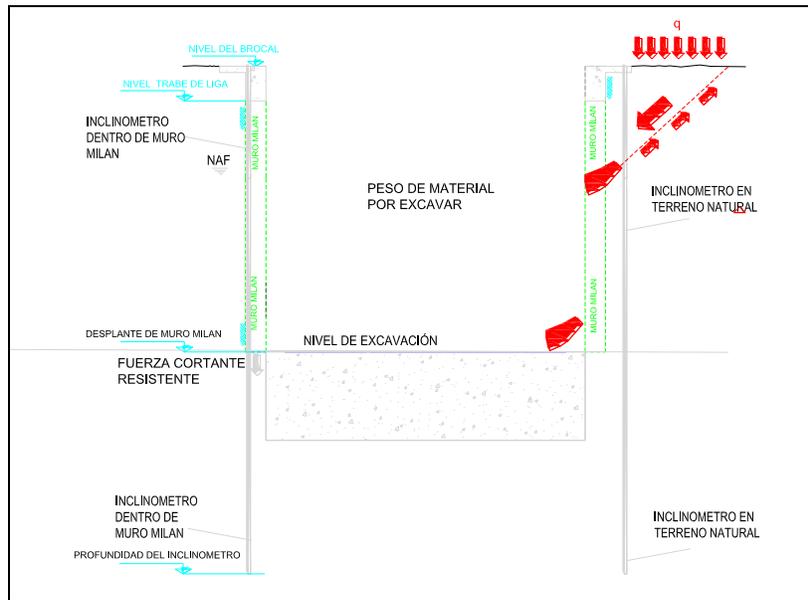


FIGURA 35. Esquema general de falla local en las paredes de la excavación <sup>(17)</sup>.

### 6.2.2.1.2) Falla por subpresión

La falla de fondo por subpresión se puede presentar cuando por debajo de la excavación se presente un estrato permeable de magnitud tal que la subpresión ejercida por el agua sea mayor a la ejercida por el peso del material a excavar (representado en figura 36).

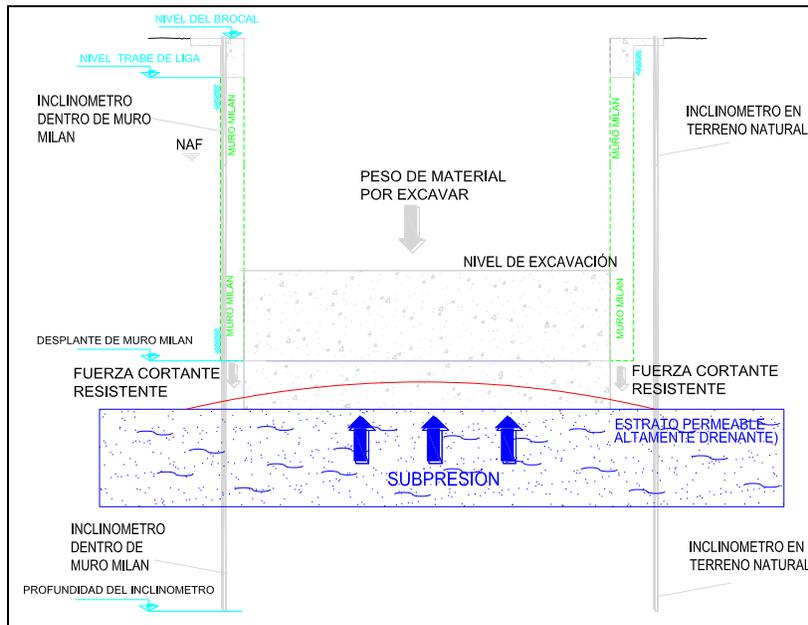


FIGURA 36. Esquema general de falla de subpresión en la Lumbreira <sup>(18)</sup>.

### 6.2.2.1.3) Falla de fondo

Falla de fondo, se puede presentar cuando se aplica una sobrecarga en el suelo adenaño a la pared de la lumbrera, en este caso los esfuerzos se transmiten y de no contar con protección en el fondo de la Lumbrera (losa de fondo) los esfuerzos se transmiten hacia el interior de la lumbrera, lo que provocaría material suelto y por ende inestabilidad tanto en el suelo como en las paredes (representado en figura 37).

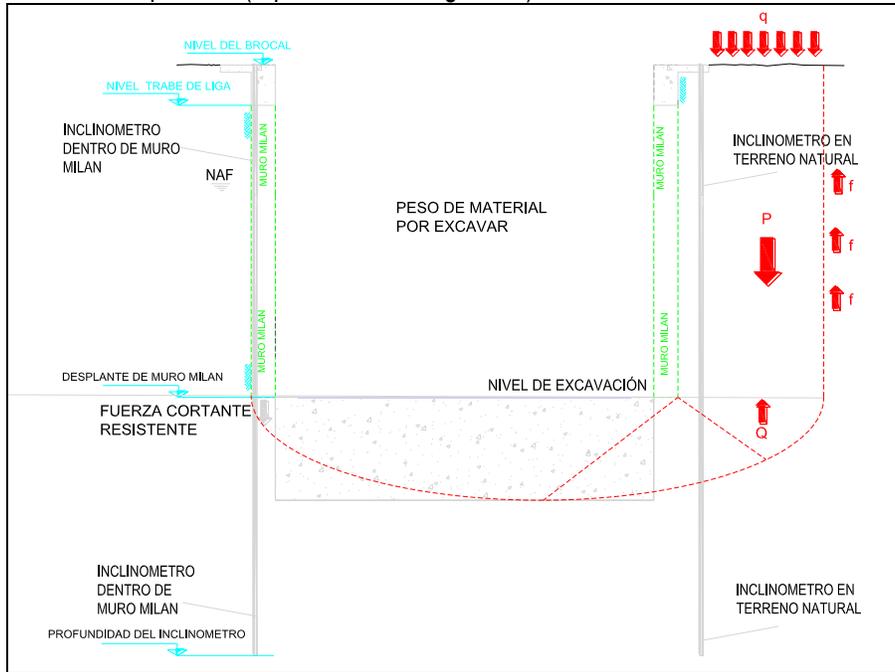


FIGURA 37. Esquema general de falla de fondo <sup>(19)</sup>.

### 6.2.2.1.4) Falla por flotación (emergimiento de Lumbrera)

Este tipo de falla, generalmente es más probable que se presente en las lumbreras que se construyen bajo el método de flotación, en cuanto la subpresión ejercida en el fondo de la Lumbrera es mayor al peso propio, esta tiende a emerger (representado en figura 38).

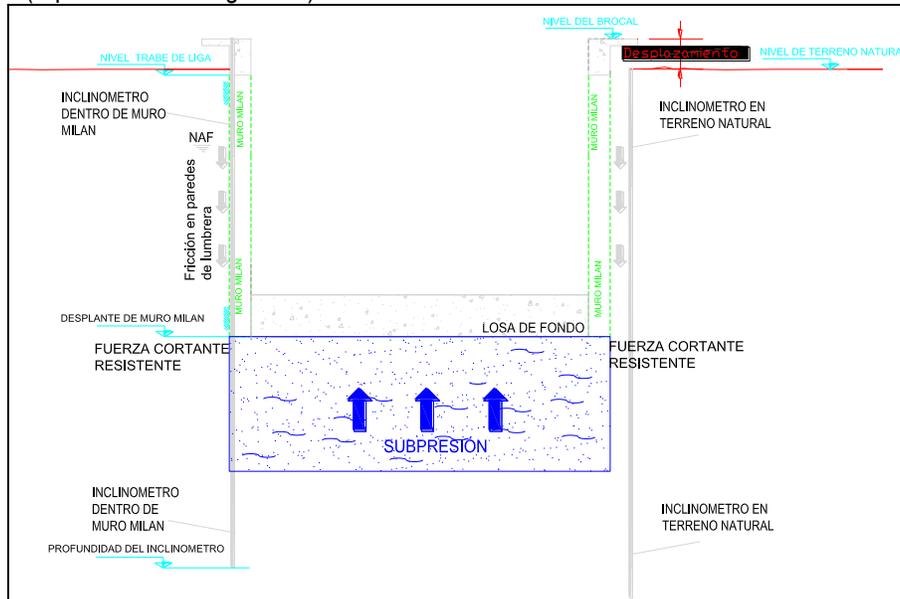


FIGURA 38. Esquema general de falla por flotación <sup>(17)</sup>.

### 6.2.3) Pozos de bombeo

Los coeficiente de permeabilidad se pueden conocer a partir de realizar pruebas de bombeo. La prueba de bombeo consiste en extraer agua de un pozo de bombeo con distintos caudales (gasto), y a su vez monitorear el comportamiento de los pozos de observación, piezómetros eléctricos y piezómetros abiertos. Los coeficientes de permeabilidad dan indicio de qué estratos tienen mayores aportaciones de agua y dirección de flujo y esto nos permite realizar el diseño más eficiente de los módulos de bombeo (número de pozo, potencia de las bombas etc.; representado en figura 39).

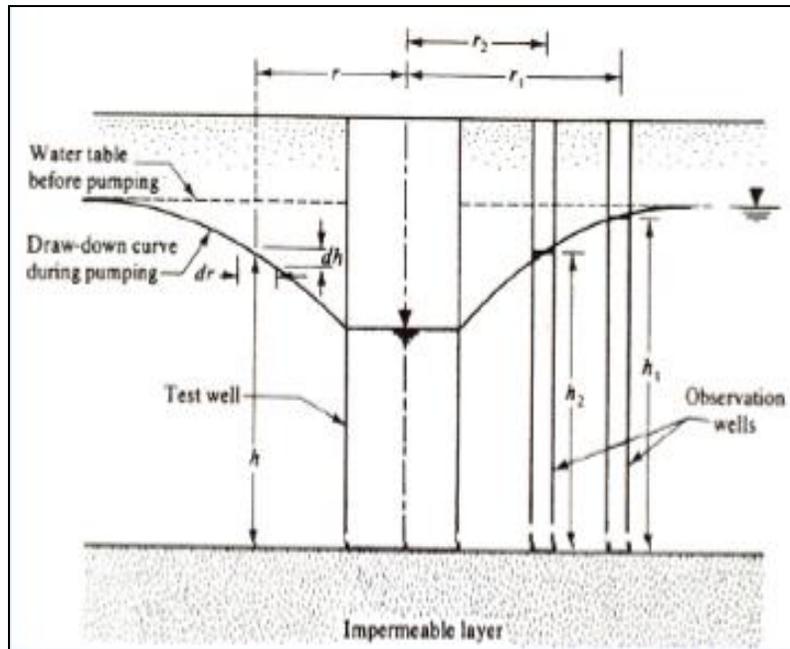


FIGURA 39. Esquema general de una prueba de bombeo para conocer los parámetros de permeabilidad del suelo <sup>(20)</sup>.

### 6.2.4) Tubos de observación en el centro de la Lumbraera

Para conocer de manera real la profundidad de agua abatida en el centro de la lumbraera (NAF), se instaló un pozo de observación al centro de la Lumbraera. Previamente se debió identificar los materiales por debajo de la lumbraera para evitar comunicar los acuíferos profundos (si es que existen) con los someros.

Para operar de manera más eficaz y evitar la extracción innecesaria de agua para el abatimiento de presiones a los equipos de bombeo se les colocó un variador de frecuencia el cual permite modificar las revoluciones (rpm) de dichos equipos. Otra manera muy eficaz es colocar válvulas de retorno en las descargas de los pozos de bombeo, estas nos permiten manipular la cantidad de agua exacta (para descarga y para retorno) para mantener el nivel dinámico (en el interior del pozo) que nosotros deseamos (generalmente por debajo del nivel de excavación; ver figura 40).

La manera que se operó el sistema de bombeo y la aplicación directa que se tuvo de pozo de observación, a grandes rasgos, fue el siguiente:

- 1.-Monitoreo del nivel de agua dentro del pozo de observación; siempre el nivel de agua dentro del pozo, y como medida de seguridad siempre debía estar como mínimo 6 m por debajo del nivel de la excavación del núcleo de la Lumbraera. Los 6 m se determinaron a partir del tiempo en que tarda en recuperarse el acuífero después de realizar bombeo.

2.- Al presentarse alguna falla en el sistema de bombeo inmediatamente se realizaba el monitoreo (de manera continua) en el pozo de observación para observar el comportamiento de la recuperación del acuífero. Si es necesario se toman medidas preventivas como la evacuación de personal, maquinaria y/o equipo que pudiesen ser afectados por una posible inundación dentro de la lumbrera.

3.- Conforme se fue avanzando con la construcción de la Lumbrera es necesario extraer más agua para lograr un abatimiento más profundo, por lo que se regulan las válvulas de retorno de los pozos de bombeo de manera que el nivel del agua por debajo del nivel de excavación se encuentre por debajo del nivel de 6 m.

4.- Cuando el bombeo con pozos perimetrales ya no es suficiente para abatir el nivel del agua, es necesario intervenir con bombeo de achique para permitir realizar los trabajos de construcción de la Lumbrera.

5.- En el momento en que el pozo de observación presentó aportaciones de agua hacia el exterior, se identificó que la presión ejercida (aportación de agua) provenía de un acuífero profundo, por lo que se tuvo que sellar dicho pozo de observación.

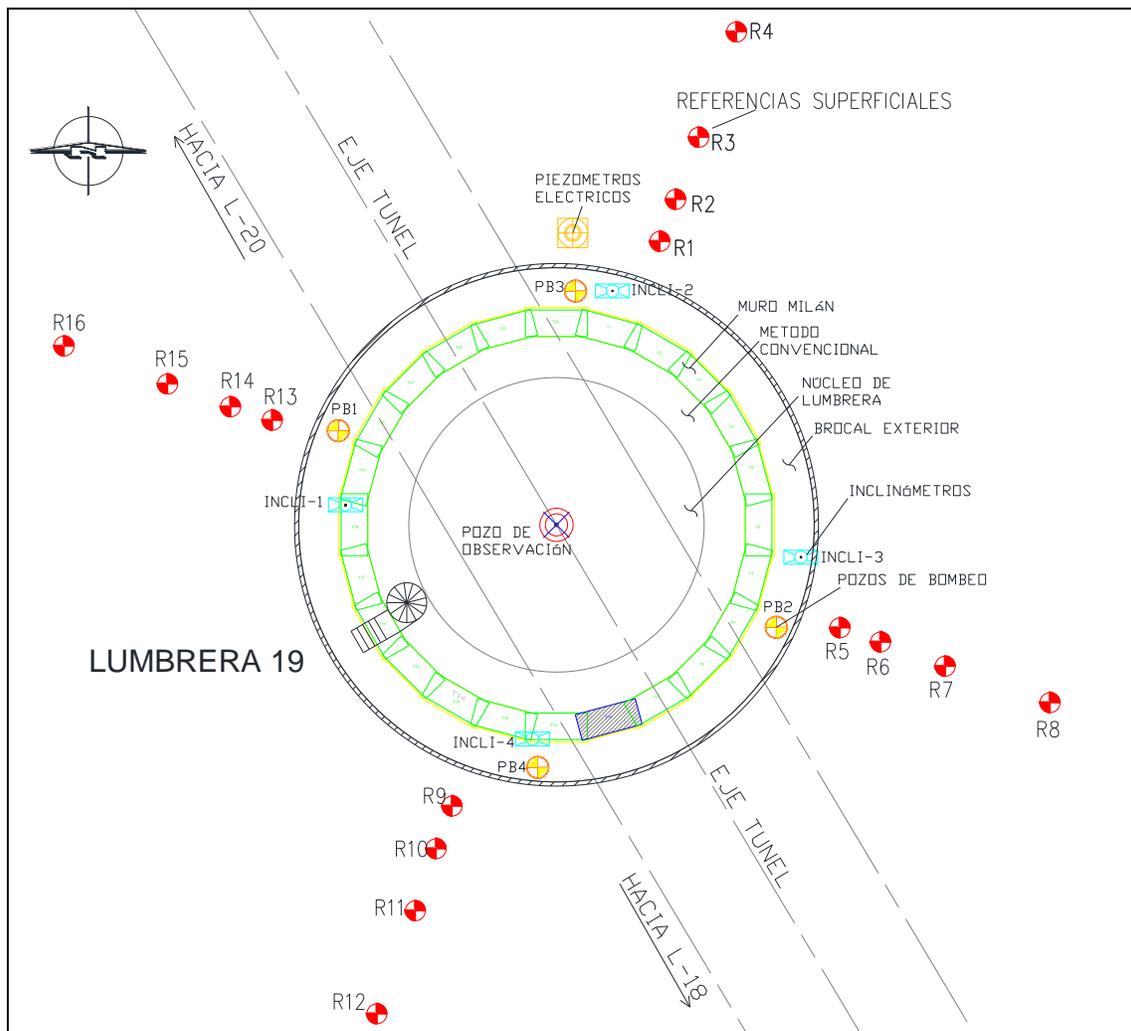


FIGURA 40. Esquema de ubicación de la lumbrera, el pozo de observación y los pozos de bombeo de la Lumbrera L-19.

## 7. PLAN DE MONITOREO, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN RECOLECTADA

### 7.1.) MONITOREO Y LECTURA DE INCLINÓMETROS

Para una mejor apreciación de este instrumento se utilizaron registros de dos Inclínómetros, el primero (1) instalado dentro del muro Milán y el segundo (2) instalado en terreno natural. Se les dio el seguimiento de acuerdo a las actividades constructivas de la Lumbra. Para ambos inclinómetros se graficaron los desplazamientos presentados a lo largo de la profundidad del Inclínómetro (ó profundidad de la Lumbra) y en una misma esquema se presentaron ambas gráficas.

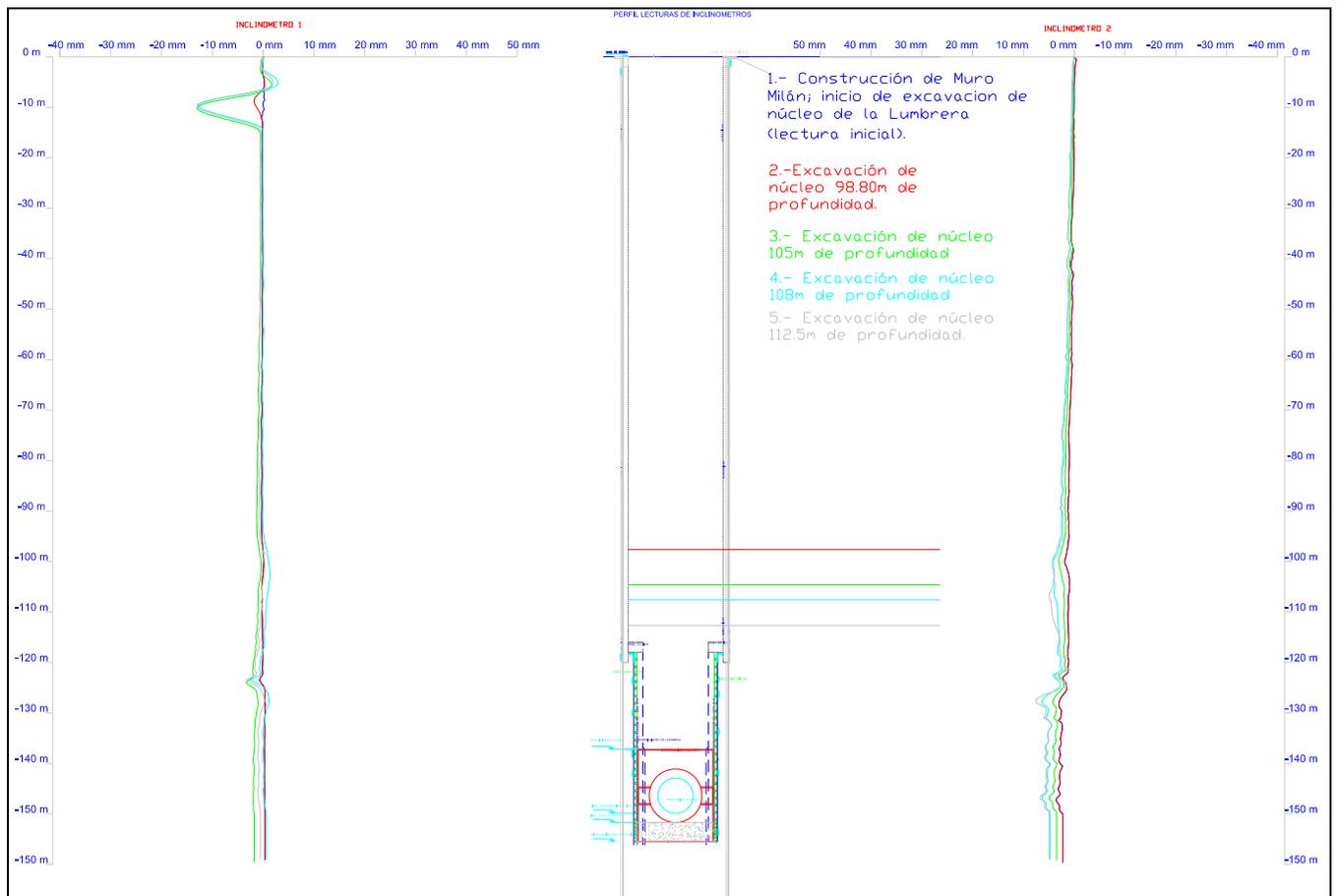


FIGURA 41. Registro de lecturas de Inclinómetros durante la etapa de excavación de núcleo de la Lumbra.

1.- Lectura inicial de Inclinómetros: La lectura inicial se toma previo al inicio del proceso constructivo de la Lumbrera. Inclinómetro 01 instalado dentro del muro Milán. Inclinómetro 2 instalado en terreno natural; ver registro de lecturas en figura 41.

2.- Excavación de núcleo de la Lumbrera, se llega a una profundidad de 98 m; se registran ligeros movimientos a 120 m de profundidad (por debajo del muro Milán). En superficie se realizan trabajos con equipo de maquinaria pesado (grúa con capacidad de 200 ton).

3.- Excavación de núcleo de la Lumbrera, se tiene una profundidad de 105 m; se presentan ligeros movimientos a 15m de profundidad; los avances de extracción de la rezaga se hacen cada vez más lentos debido a la profundidad. En superficie se realizan trabajos con equipo de maquinaria pesado (grúa con capacidad de 200 ton).

4.- Continúa la excavación del núcleo de la Lumbrera, se llega a la profundidad de -108 m; en superficie se realizan trabajos con equipo de maquinaria pesado (grúa con capacidad de 200 ton).

5.- Continúa la excavación de núcleo de la lumbrera, se alcanza una profundidad de -112.5 m; se presentan ligeros movimientos por debajo del desplante del muro Milán. En superficie se realizan trabajos con equipo de maquinaria pesado (grúa con capacidad de 200 ton).

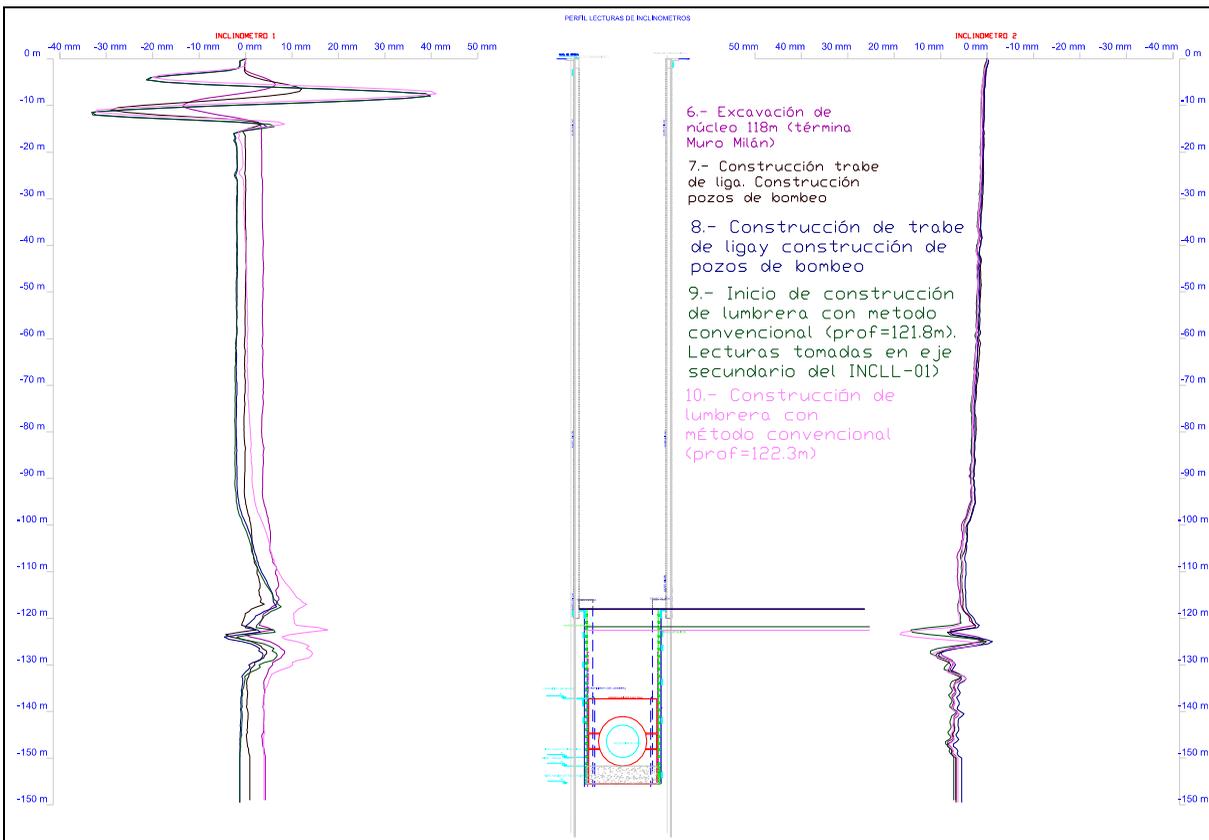


FIGURA 42. Registro de lecturas de Inclinómetros al llegar a una profundidad de excavación de 118m, además se inicia la construcción de la trabe de liga.

6.- Excavación de núcleo de la Lumbrera con una profundidad de -118 m (desplante de muro Milán); se presenta desplazamientos por debajo del muro Milán y a 15 m de profundidad. En superficie se realizan trabajos con equipo de maquinaria pesado (grúa con capacidad de 200 ton); ver registros en figura 42.

7.- Construcción de trabe de liga (unión del muro Milán con la construcción de la Lumbraera por método convencional). Construcción de pozos de bombeo, en superficie se registran movimientos abruptos, probablemente influenciados por la perforación de los pozos.

8.- Construcción de trabe de liga (unión del muro Milán con la construcción de la Lumbraera por método convencional). Construcción de pozos de bombeo, en superficie se registran movimientos abruptos, probablemente influenciados por la perforación de los pozos.

9.- Reinicia la excavación del núcleo, se llega a una profundidad de -121.8 m. La construcción de la Lumbraera es con método convencional. Se presentan obstrucción en la tubería del Inclínómetro 01 (se presentan movimientos por debajo de la excavación). Continúa la construcción de pozos de bombeo.

10.- Continúa la construcción de la Lumbraera por método convencional se presentan obstrucción en la tubería del Inclínómetro 01 (se presentan movimientos por debajo de la excavación). Continúa la construcción de pozos de bombeo.

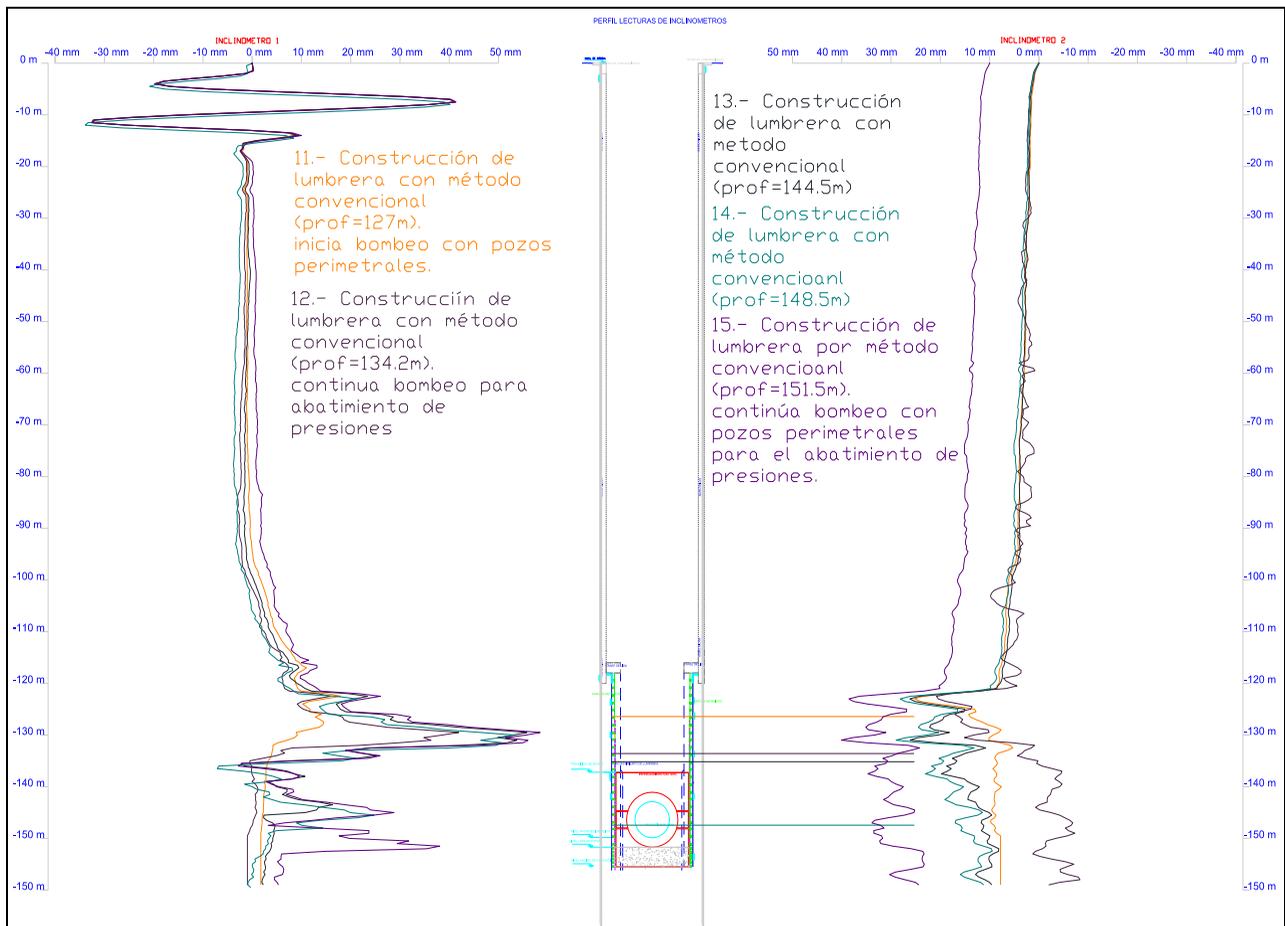


FIGURA 43. Registro de lecturas de Inclinómetros; se realiza la construcción de la Lumbraera bajo el método convencional a una profundidad del orden de los 145m.

11.- Ambos Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la Lumbraera continua su construcción con método convencional, se llega a una profundidad de -127 m; ver registros en figura 43.

12.- Ambos Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la Lumbrera. Continúa la construcción de la Lumbrera con método convencional con una profundidad de excavación -134.2 m.

13.- Ambos Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la Lumbrera. Se llega a una profundidad de -144.5 m.

14.- Ambos Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la Lumbrera. Continúa la excavación y construcción con método convencional a una profundidad de -148.5 m.

15.- Ambos Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la Lumbrera. Continúa la construcción con método convencional, excavación y abatimiento de presiones con pozos de bombeo; se llega a una profundidad de -151.5 m.

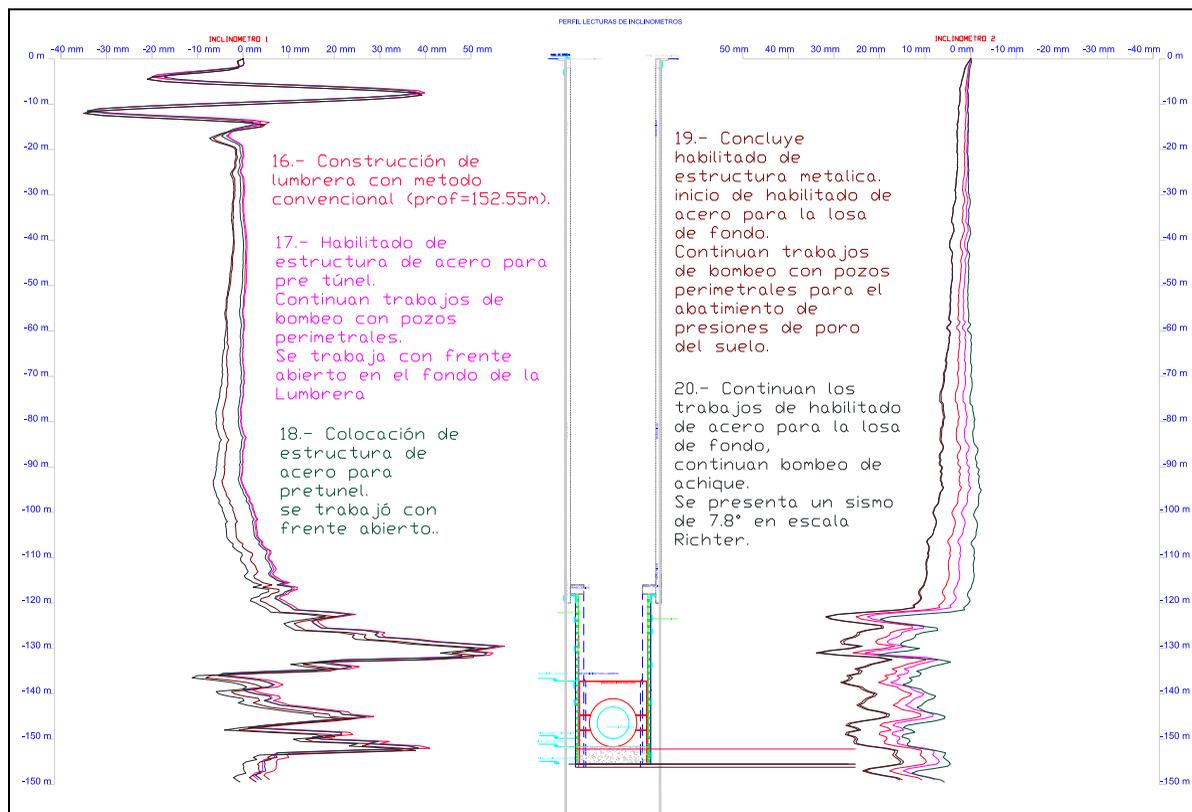


FIGURA 44. Registro de lecturas de Inclinómetros, se tiene la profundidad de máxima excavación y se realizan trabajos de armado de acero de refuerzo para la losa de fondo.

16.- Continúa la excavación de núcleo, bombeo con pozos perimetrales, y construcción de paredes con método convencional. Se llega al nivel máximo de excavación -152.5 m.; ver registros en figura 44.

17.- Se tiene el nivel máximo de excavación (-152.5 m); en el fondo de la Lumbrera se coloca la estructura para el emportalamiento. Los Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la Lumbrera, como medida de seguridad continua el abatimiento de presiones con pozos de bombeo.

18.- Se registran movimientos hacia el centro de la Lumbrera. Se trabaja con el fondo abierto a una profundidad de -152.5 m; continúa abatimiento de presiones con pozos de bombeo.

19.- Ambos Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la lumbrera colocación de estructura para emportalamiento. Se trabaja con el fondo de la Lumbrera abierto (-152.5 m, nivel máximo de excavación).

20.- Los Inclinómetros registran movimientos hacia el centro de la lumbrera colocación de estructura para emportalamiento de túnel. Se trabaja con el fondo de la lumbrera abierto (nivel máximo de excavación 152.5 m). **Durante esta etapa se presentó un sismo de 7.8° en escala Richter.** Se presentan desplazamientos del suelo hacia el interior de la lumbrera.

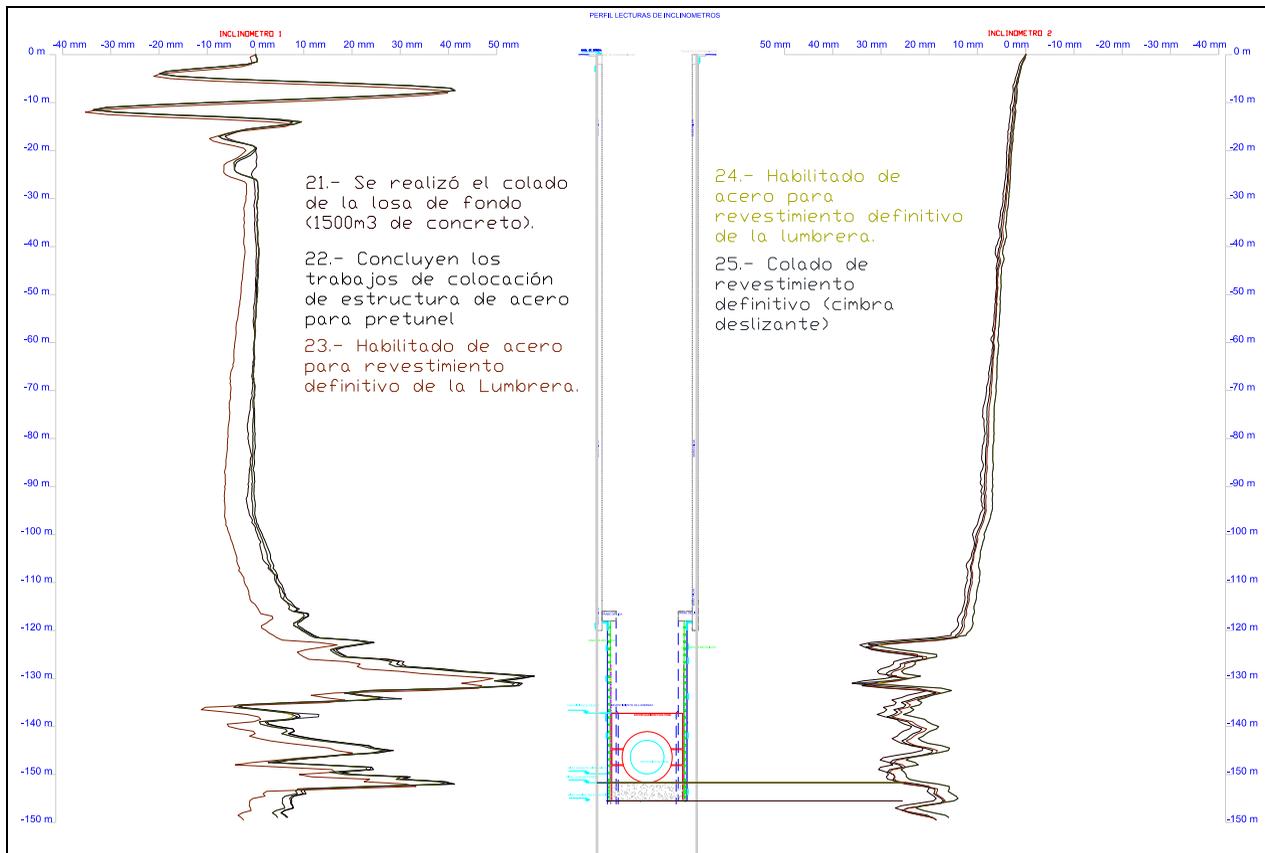


FIGURA 45. Registro de lecturas de Inclinómetros; se realiza la colocación de concreto en losa de fondo.

21.- Concluye el emportalamiento y armado de acero de refuerzo de la losa de fondo. Colocación de concreto en el fondo de la Lumbrera. Se presentan desplazamientos hacia el centro de la Lumbrera; ver registro de lecturas en figura 45.

22.- Continúa la colocación de concreto en losa de fondo de la Lumbrera Continúa el abatimiento de presiones con pozos de bombeo. No se registran desplazamientos. Continúa abatimiento de presiones con pozos de bombeo.

23.- Colocación de acero de refuerzo para revestimiento definitivo en la zona de construcción por método convencional. No se registran desplazamientos. Continúa abatimiento de presiones con pozos de bombeo.

24.- Colocación de acero de refuerzo para revestimiento definitivo en la zona de construcción por método convencional. No se registran desplazamientos. Continúa abatimiento de presiones con pozos de bombeo.

25.- Colocación de concreto con cimbra deslizante en el fondo de la Lumbra para revestimiento definitivo de la lumbra. Continúa bombeo para abatir presiones. No se registran movimientos.

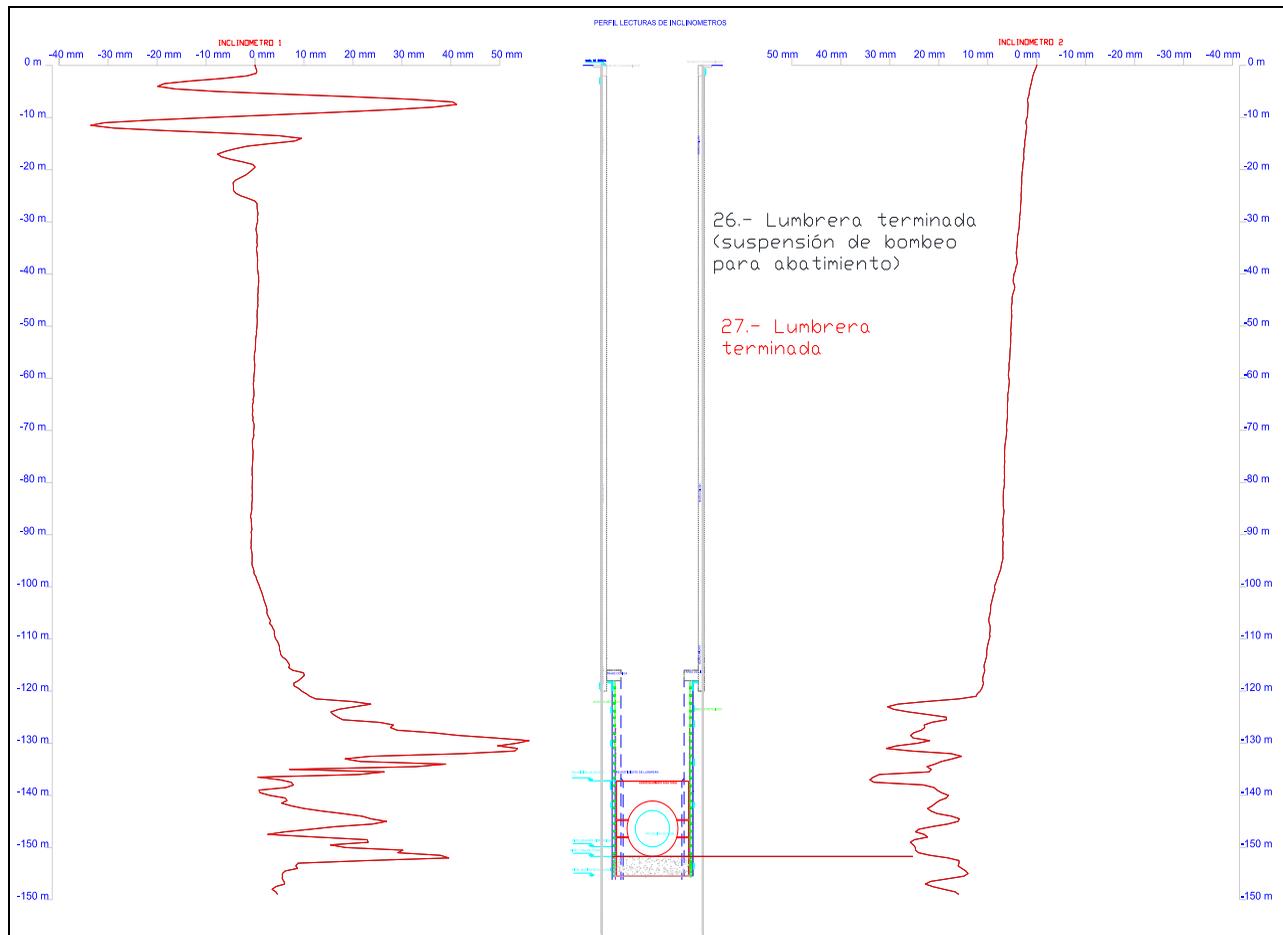


FIGURA 46. Registro de lecturas de Inclinómetros, ya se cuenta con losa de fondo y revestimiento definitivo.

26.- Fraguado de concreto de revestimiento definitivo (resistencia máxima 28 días). Termina de construcción de la Lumbra. Continúa bombeo para abatimiento de presiones. No se registran movimientos y/o desplazamientos en el suelo ni en la estructura; ver registros en figura 46.

27.- Lumbra terminada suspensión de bombeo con pozos perimetrales para el abatimiento de presiones de poro del suelo. No se registran movimientos.

## 7.2) MONITOREO Y LECTURA DE PIEZÓMETROS ELÉCTRICOS

De acuerdo al diseño geotécnico de la Lumbrera, puede haber la necesidad de realizar un cierto abatimiento de presiones de poro en el suelo para minimizar los riesgos de una posible falla. Para el estudio de este instrumento, y de igual manera que los anteriores, decidí utilizar el caso más representativo y en este caso el registro histórico de los piezómetros eléctricos instalados en la Lumbrera L-20. De acuerdo a la memoria de cálculo se indicaba el riesgo de presentarse una falla mecánica en el suelo de tipo “falla de subpresión”, y para contrarrestar tal efecto se debían abatir las presiones de poro hasta estar fuera de riesgo.

El registro histórico de presiones se realizó desde el inicio de la excavación del núcleo. La frecuencia de toma de lecturas va en función de la etapa de construcción; en la figura 47 se aprecian las lecturas desde la instalación de dichos instrumentos hasta el término de la construcción de la Lumbrera.

Se tenía conocimiento que el NAF estaba a una profundidad de los -80 m, y de acuerdo al modelo geotécnico de la Lumbrera se tenía que llegar a un abatimiento del NAF de los 106 m para evitar cualquier tipo de riesgo por falla mecánica. Para lograr el abatimiento se construyó un módulo de bombeo (construcción y equipamiento de pozos de bombeo) en la periferia de la Lumbrera. Después de haber instalado el módulo de bombeo se realizó una prueba de funcionamiento, con la cual se pretendía observar el correcto funcionamiento de los equipos e instrumentos y con ello predecir si era suficiente y/o se debía incrementar el no de pozos de bombeo. En la figura 48, 49 y 50 se visualiza diagramas de presiones en el cual se indican las condiciones iniciales y resultados de la prueba funcionamiento al módulo de bombeo.

Después de realizar las pruebas de funcionamiento y tener bien definidas las condiciones iniciales se procedió con la operación de bombeo de forma continua. En la figura 51 se muestra un diagrama de presiones en el cual se indican los resultados y/o presiones abatidas. Con ello se redujo el riesgo de la falla mecánica y se trabajó con mayor confianza durante la excavación. Cabe señalar que el bombeo se realizó de forma continua hasta concluir con la construcción de la Lumbrera, ya que durante el proceso de excavación se presentaban filtraciones hacia el interior de la excavación.

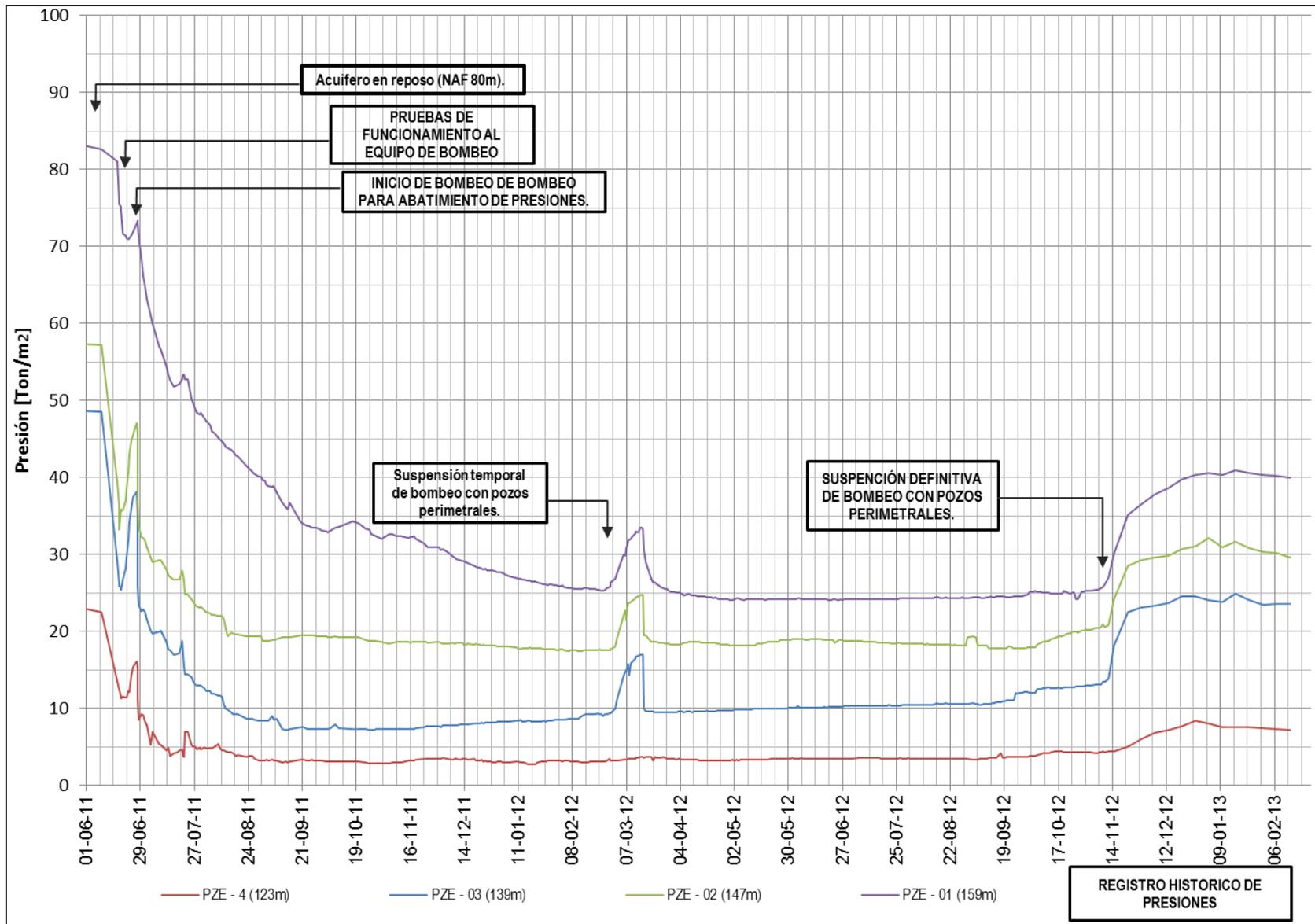
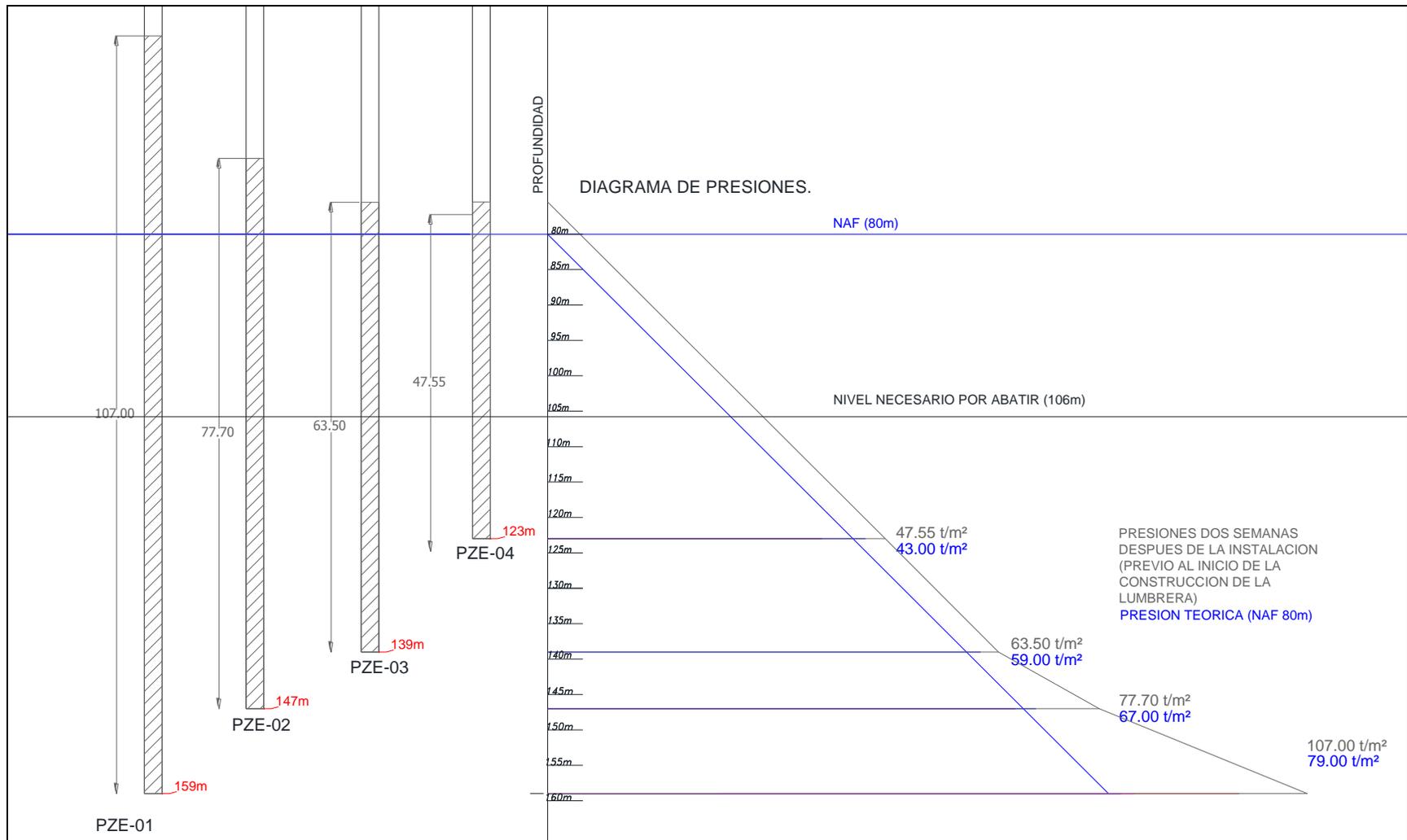
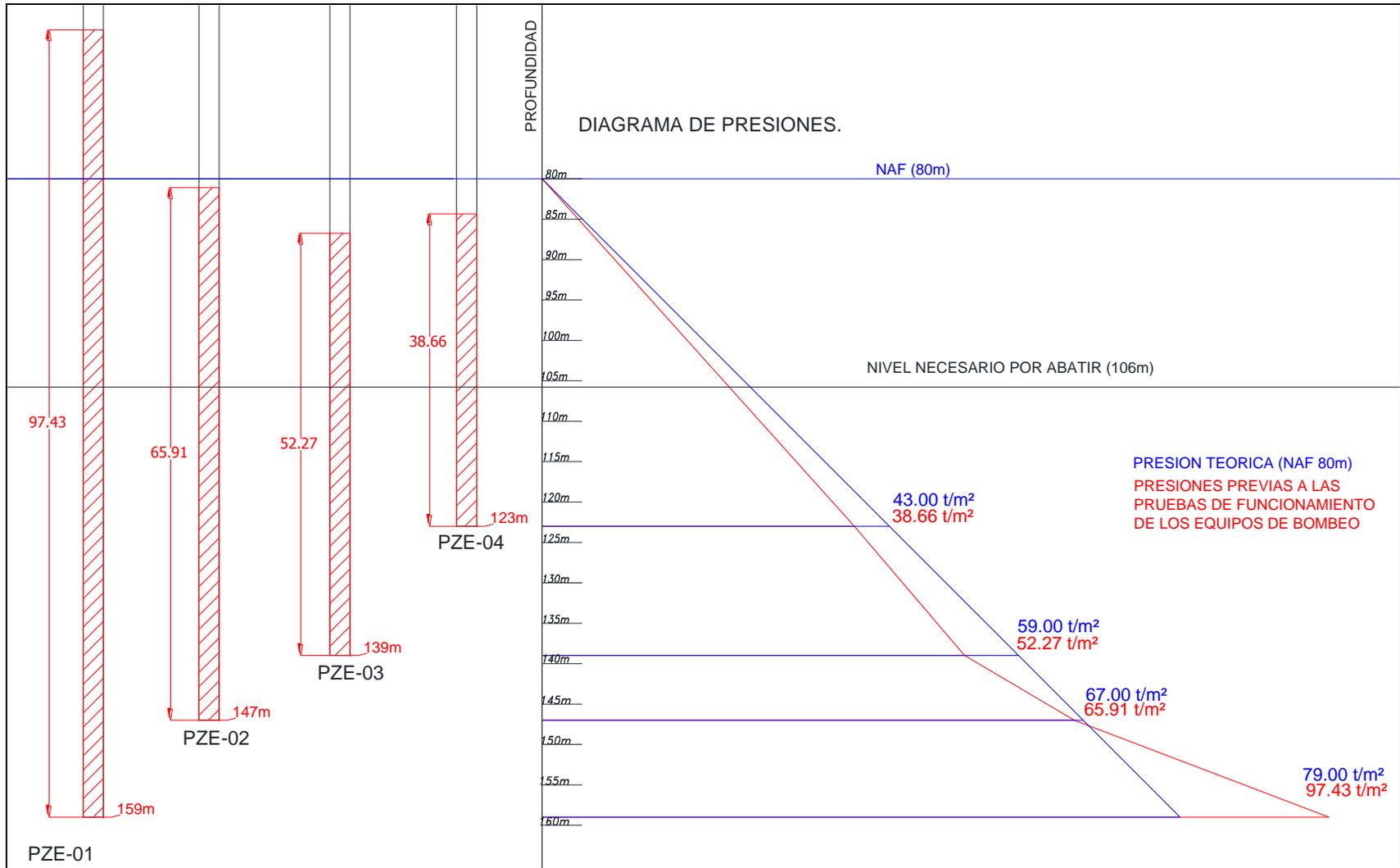


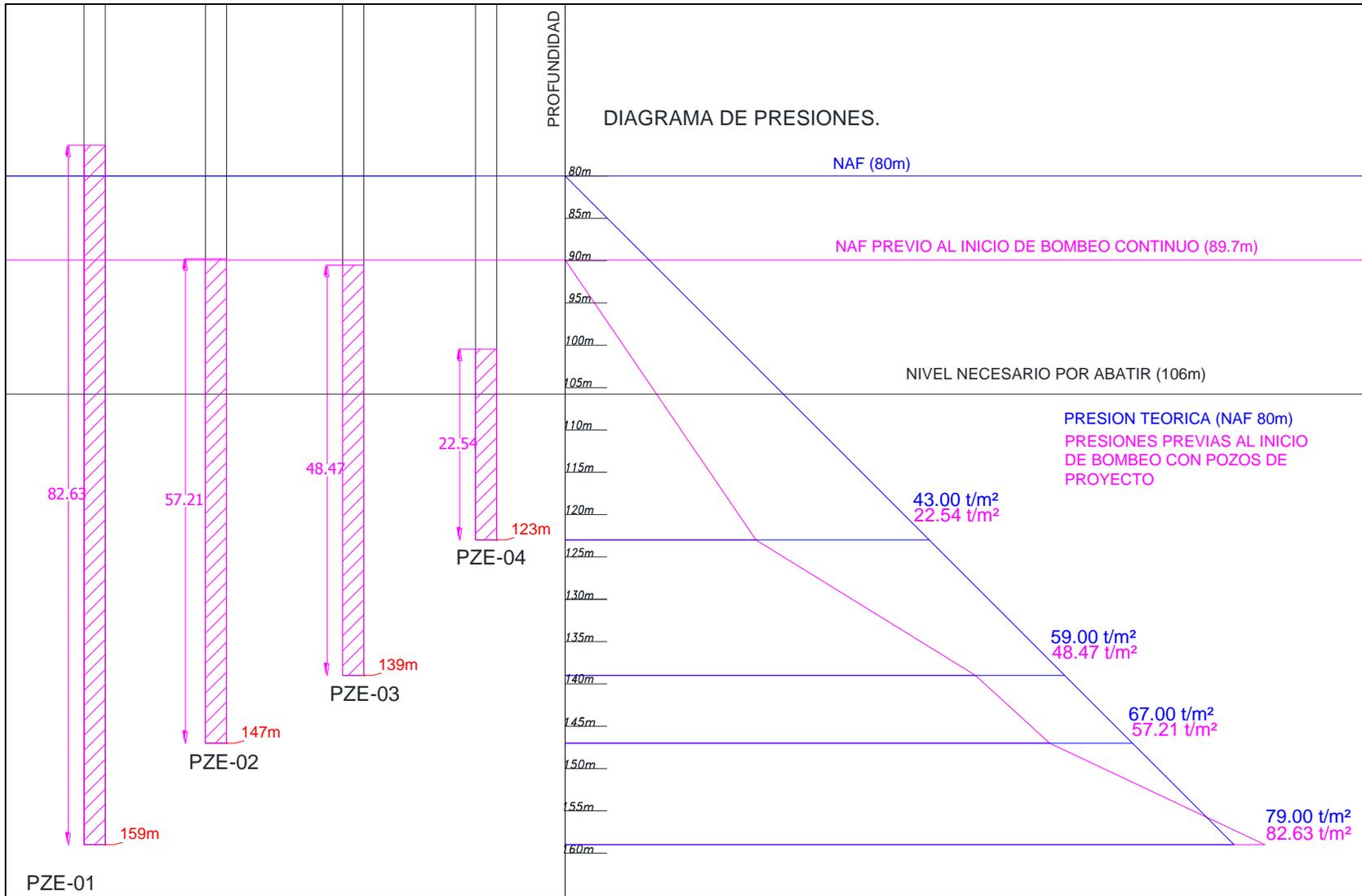
FIGURA 47. Registro histórico de piezómetros eléctricos instalados en la lumbrera L-20.



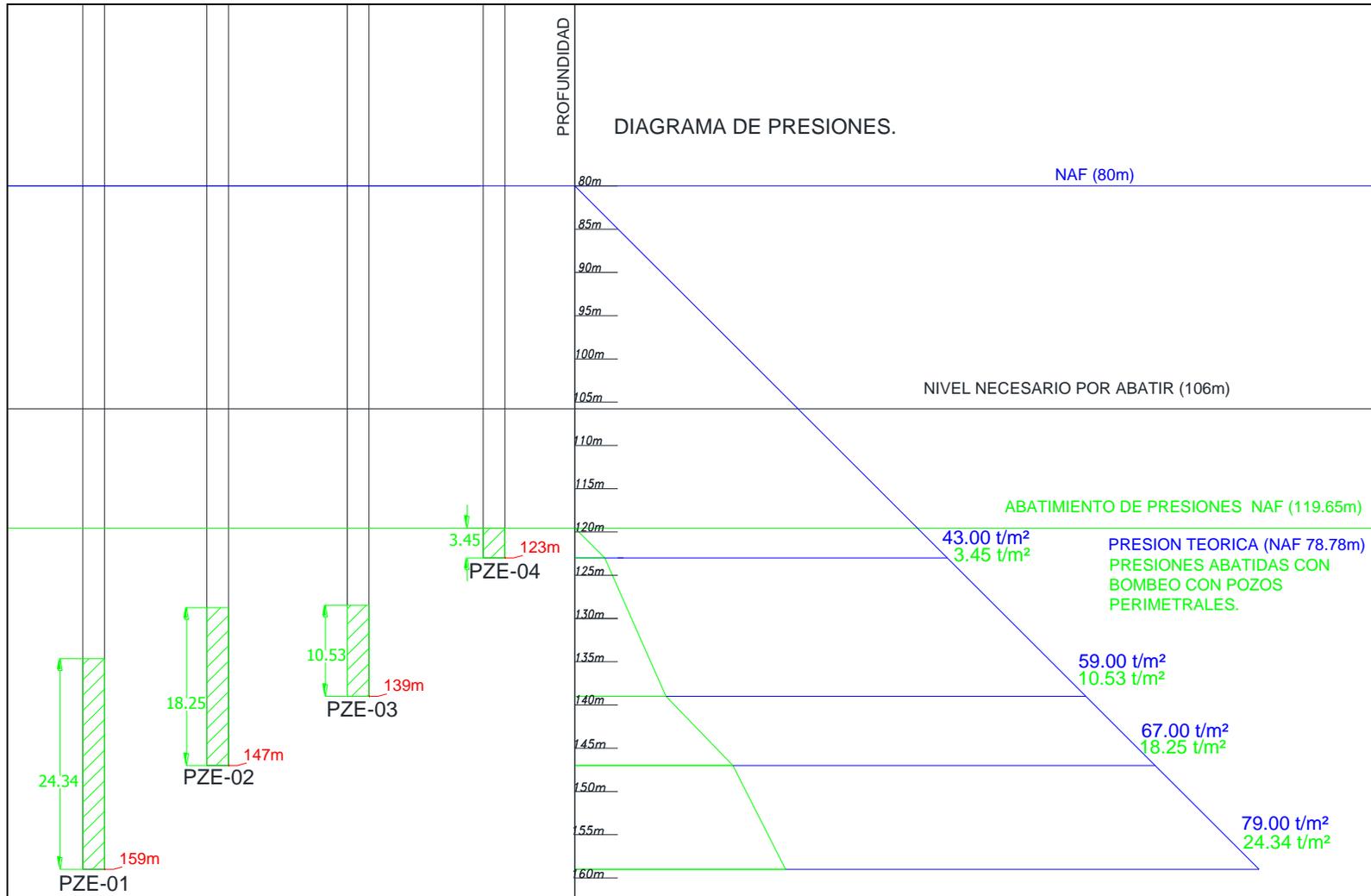
**FIGURA 48.** La memoria de cálculo y análisis geotécnico de la Lumbra indicaban que para minimizar el riesgo de cualquier tipo de falla mecánica se tenía que realizar un abatimiento del NAF de los -80 m a los -106 m). En el diagrama se observa el diagrama de presiones teórico (con NAF de -80 m) además de la presión registrada en los piezómetros dos semanas después de haber sido instalados.



**FIGURA 49.** Para lograr el abatimiento del NAF, se realizó la colocación de un módulo de bombeo (construcción de pozos de bombeo, equipamiento, líneas de descargas, etc.); en el diagrama se indican las presiones previas a las pruebas de funcionamiento (presiones sin bombeo).



**FIGURA 50.** Después de realizar el equipamiento de los pozos de bombeo se realizaron pruebas de funcionamiento a dichos equipos, lo cual produce una perturbación en el acuífero y se consideran otras condiciones. Al terminar las pruebas de funcionamiento al módulo de bombeo, se registraron las presiones, las cuales se indican en el diagrama (registro previo al bombeo de manera continua para el abatimiento de presiones).



**FIGURA 51.** Después de cierto tiempo de realizar el bombeo de manera continua, se obtuvo un Máximo abatimiento (119.5 m) por encima de lo necesario para eliminar los riesgos de una posible falla de la lumbrera (106 m). Este abatimiento se consiguió después de varias semanas de realizar el bombeo en la periferia de la lumbrera. Se decidió mantener el bombeo continuo como medida preventiva y con ello reducir las filtraciones de agua hacia el interior de la Lumbrera.

### 7.3) MONITOREO Y LECTURA DE TUBO DE OBSERVACIÓN INSTALADO EN EL CENTRO DE LA LUMBRERA

En el caso particular de la Lumbrera L-19, se instaló un tubo de observación en el centro de la Lumbrera, al realizar el monitoreo nos permitía conocer el nivel de agua freática y esto nos daba pauta para determinar si podíamos entrar al fondo para continuar con la propia construcción de la Lumbrera, ver figuras 52 y 53. En caso que se requería un mayor abatimiento el tubo de observación nos daba un parámetro de que tantas bombas deberían de estar en funcionamiento, en otras palabras con este instrumento se tenía otro parámetro para optimizar el funcionamiento del módulo de bombeo; ver figuras 54 y 55. Se llegó a una etapa en que el nivel de agua estaba por encima del tubo de observación, con lo cual dicho instrumento quedaba obsoleto, ver figura 56. Para continuar la construcción de la Lumbrera L-19, y de acuerdo a los estudios y modelos geo hidrológicos se encontraban un manto acuífero profundo y para contrarrestar las presiones y NAF se construyó y puso en funcionamiento un segundo módulo de bombeo, este contempló pozos profundos.

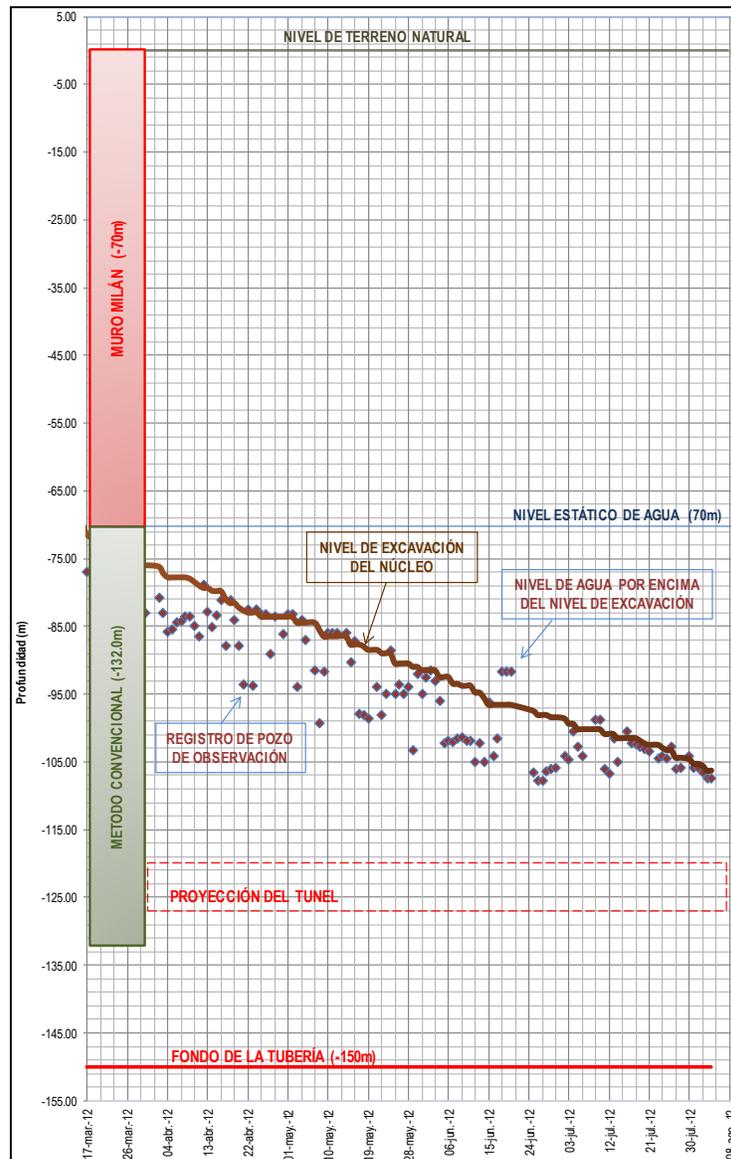
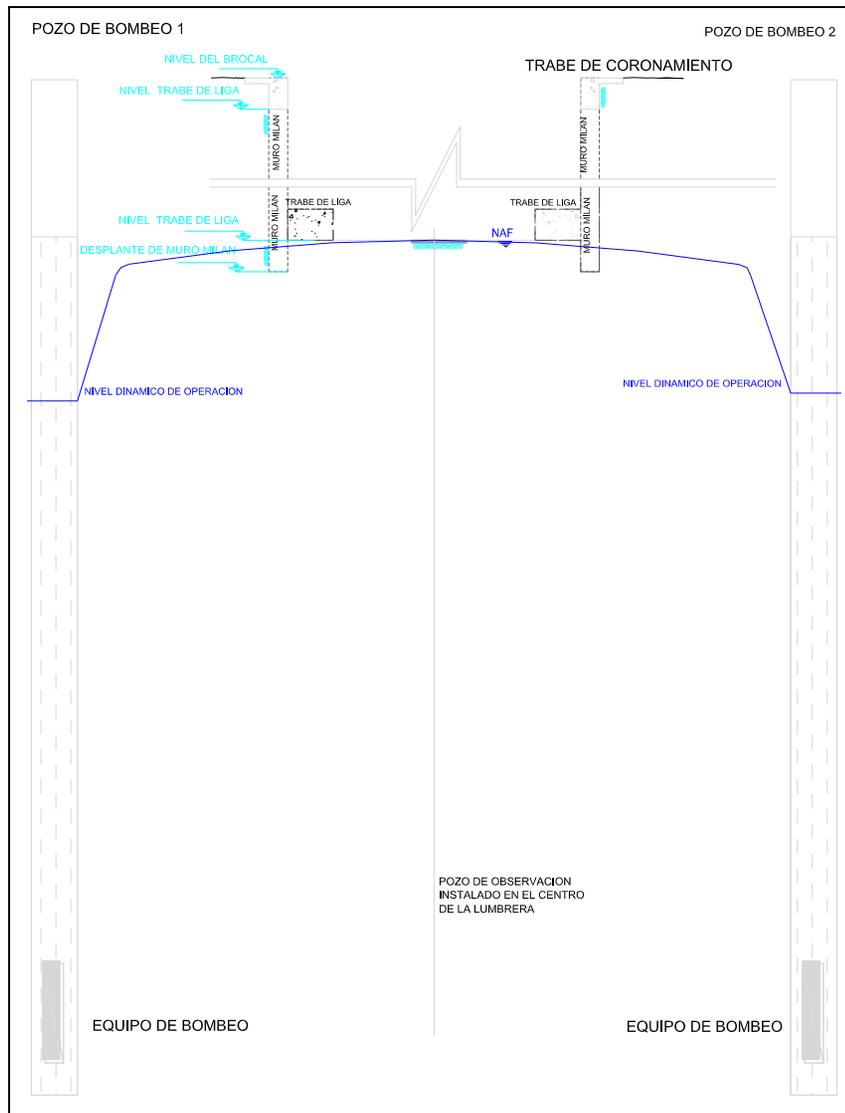
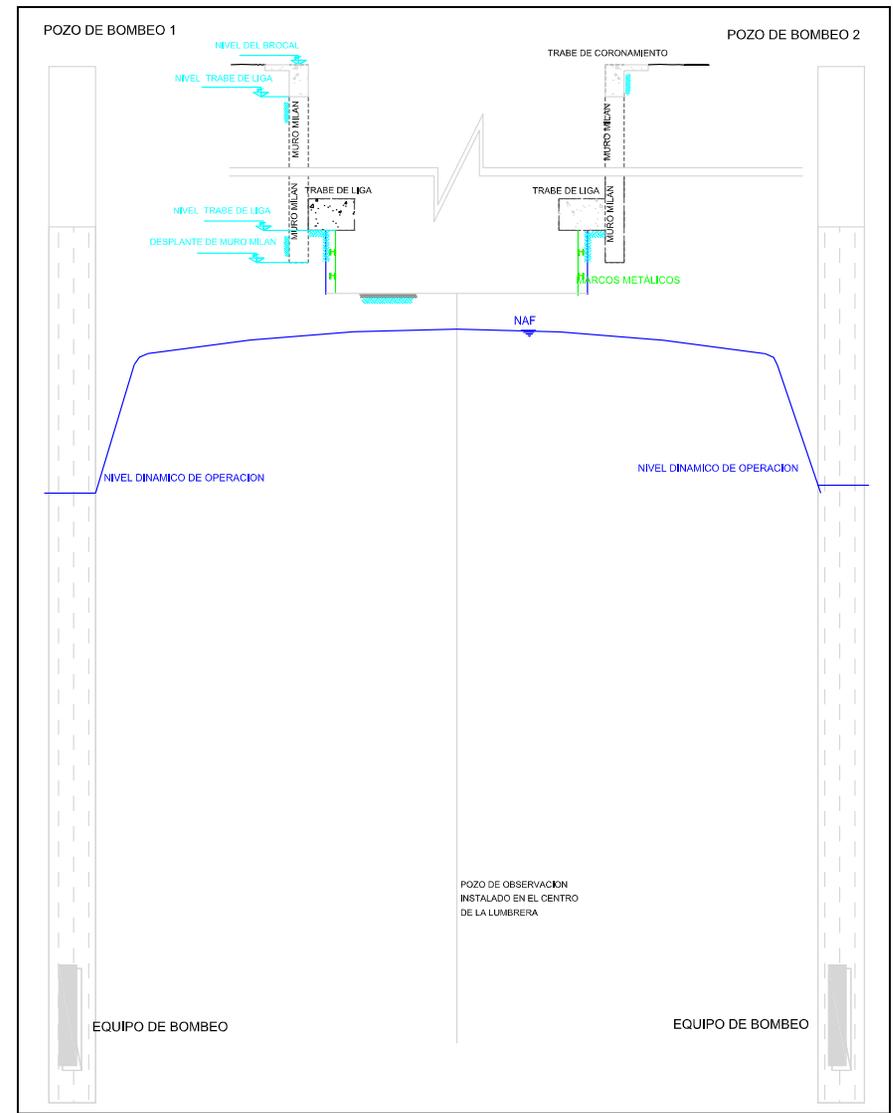


FIGURA 52. Registro histórico de pozo de observación; la línea escalonada representa el nivel de excavación, mientras que los puntos representan los registros del pozo de observación instalado en el centro de la Lumbrera.



**FIGURA 53.** Instalación de un pozo de observación en el centro de la Lumbrera; en ésta se indica la operación de pozos de bombeo y calibrando las válvulas de retorno se lograba un ligero abatimiento (6 m) para continuar con la construcción de la Lumbrera.



**FIGURA 54.** Conforme se va avanzando en la construcción de la Lumbrera (mayor profundidad) es necesario realizar un mayor abatimiento en las presiones; para ello se calibran las válvulas de retorno de los pozos de bombeo. Generalmente las válvulas se van abriendo de acuerdo al nivel del pozo de observación del centro de la Lumbrera.

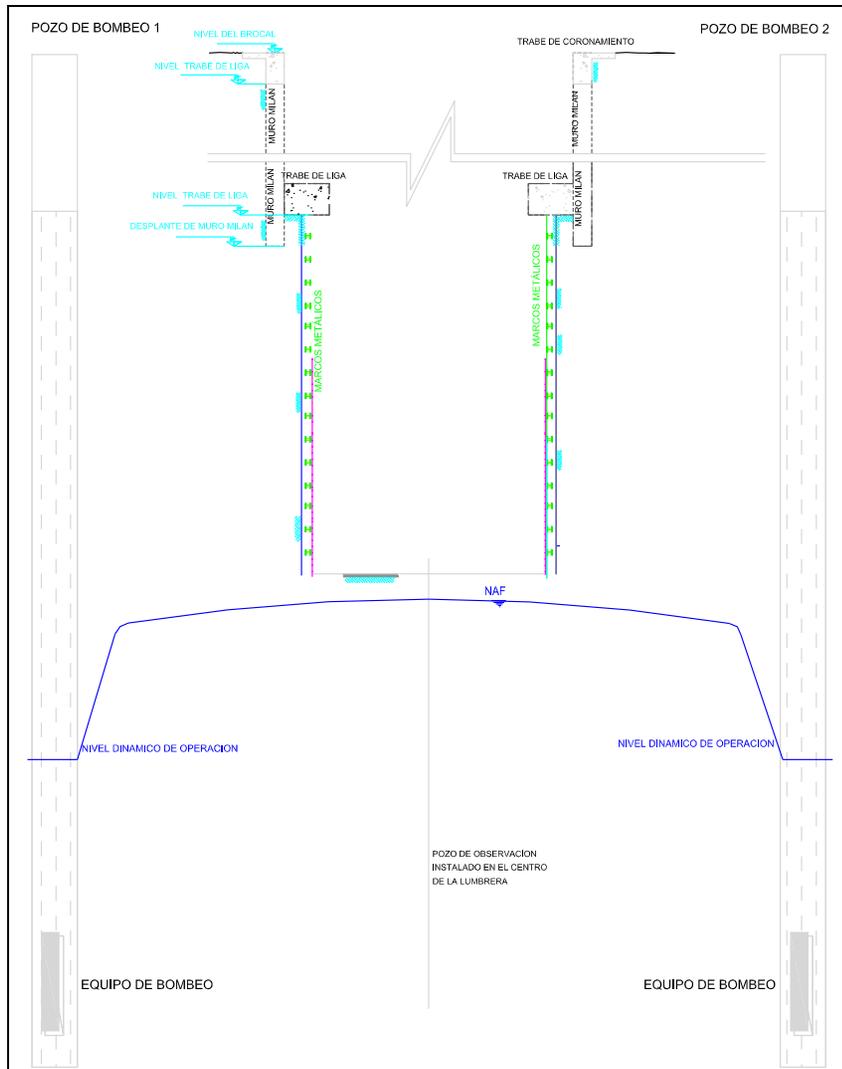


FIGURA 55. Conforme avanza la construcción de la Lumbrera es necesario un abatimiento mayor.

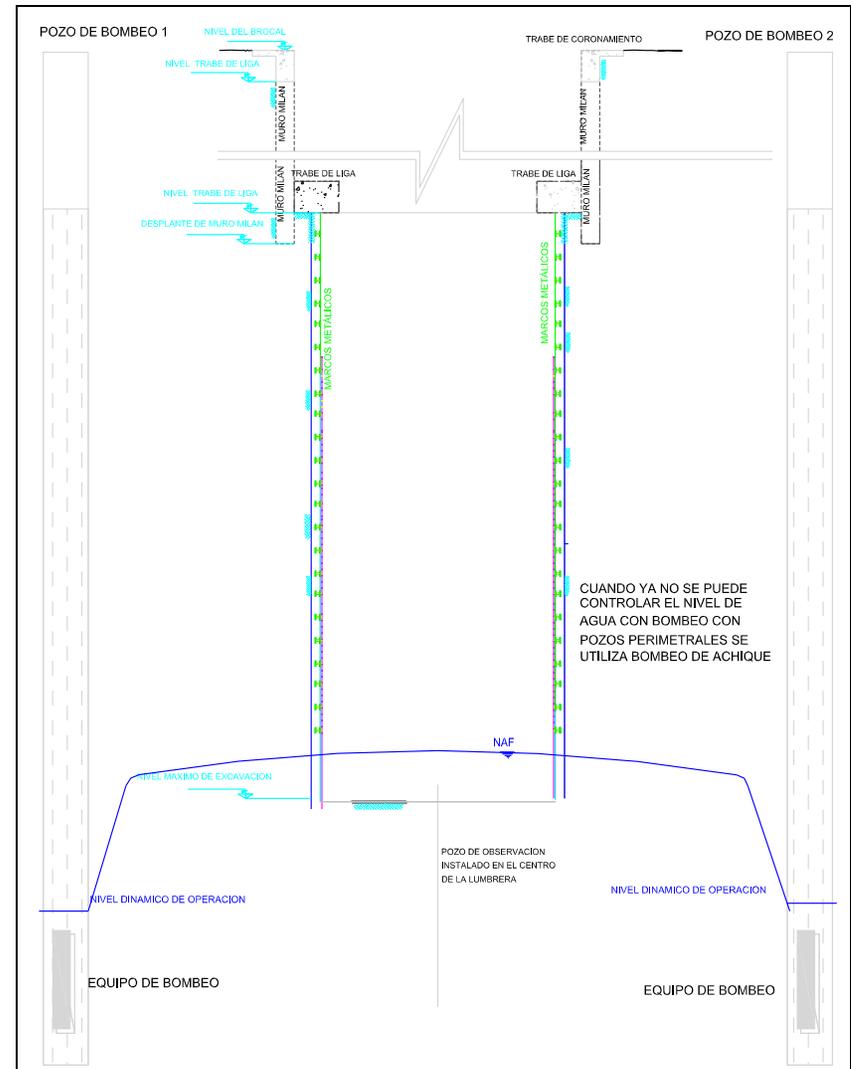


FIGURA 56. Al llegar al máximo nivel de abatimiento con pozos de bombeo es necesario intervenir con bombeo de achique para permitir continuar con los trabajos de construcción. Al llegar a ésta etapa el pozo de observación instalado en el centro de la Lumbrera es cancelado para evitar cualquier tipo de comunicación con otros acuíferos.

## 7.4) MONITOREO Y LECTURAS DE REFERENCIAS SUPERFICIALES

Paralelo al mejoramiento de suelo y construcción de brocales de la Lumbra L-18, se colocaron de forma radial, 20 referencias superficiales, ver figura 57. Al realizar los monitores se tomaba en cuenta la etapa de construcción y/o, en su caso, se tenían registros de las maniobras que se realizaban alrededor de las referencias. En todas las referencias se observó que conforme continuaba la construcción estas presentaron asentamientos; los asentamientos registrados se asociaron a las maniobras realizadas con equipo de maquinaria pesada, asentamientos regionales y a la influencia de la operación del módulo de bombeo. Los resultados obtenidos ayudaron a determinar que durante los procesos constructivos no se presentó algún indicio de falla mecánica y/o en la estructura, ver figura 58.

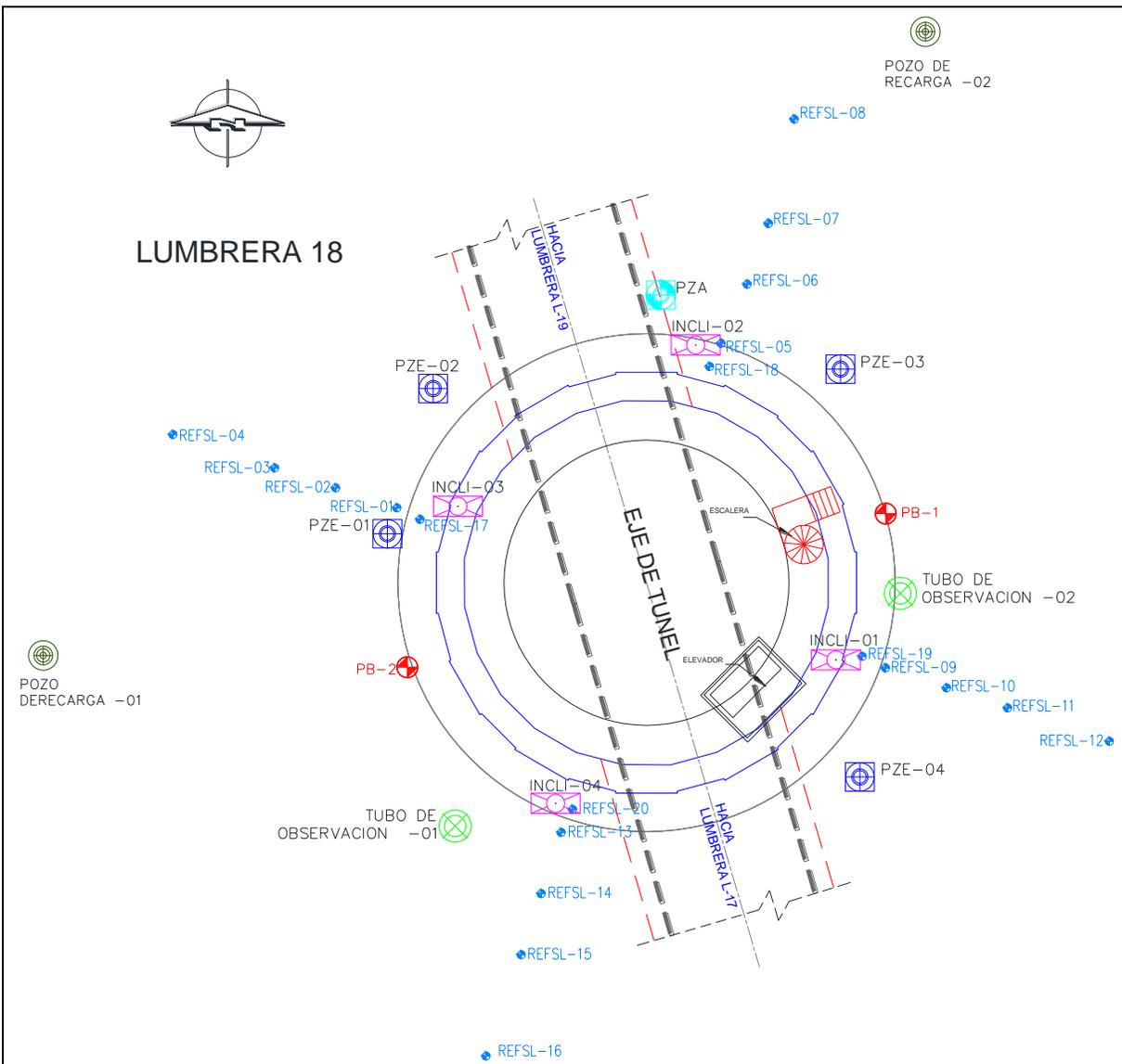
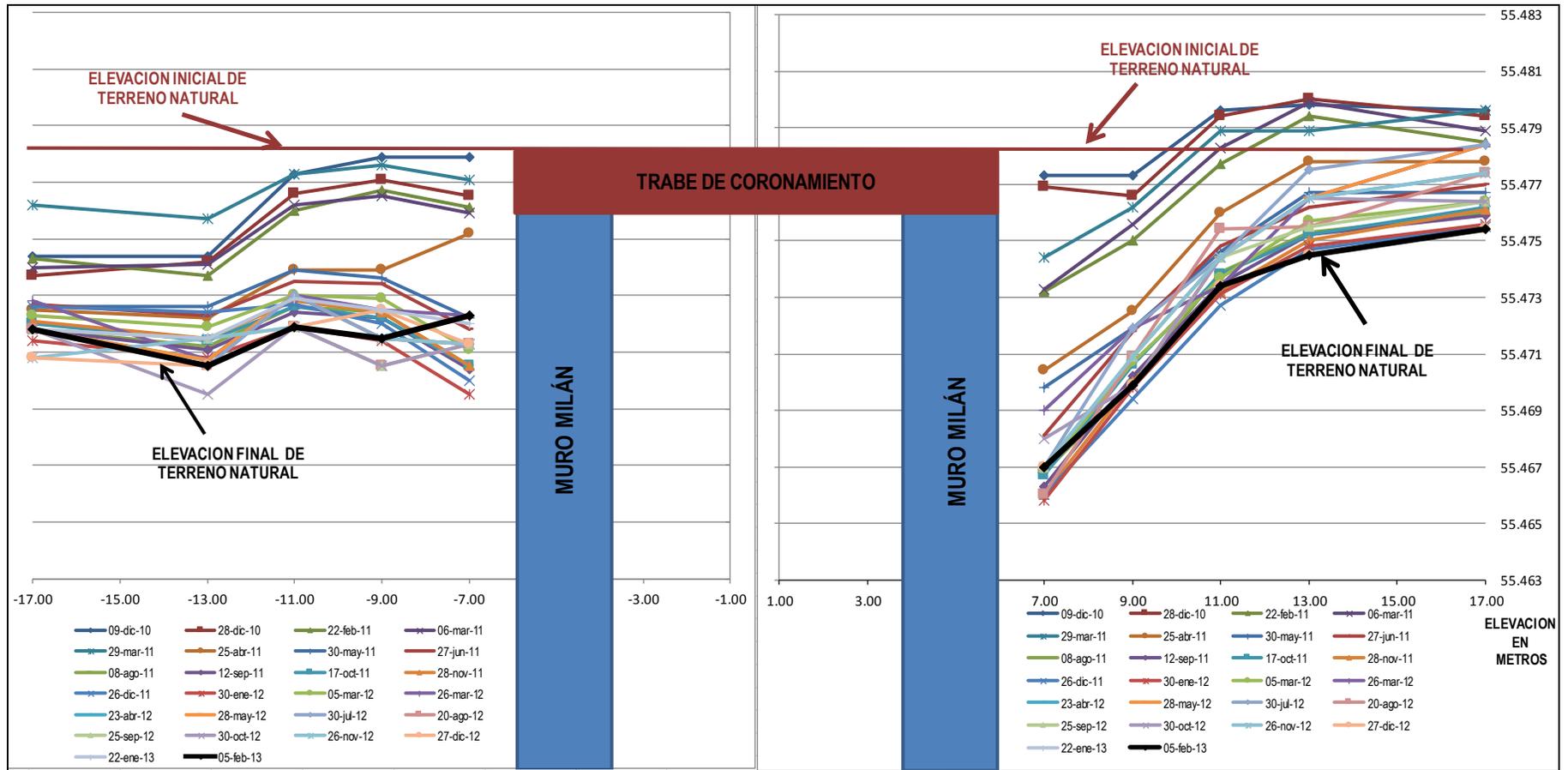


FIGURA 57. Esquema general de colocación de las referencias superficiales; se colocaron a diferentes distancias radiales: 7 m, 9 m, 11 m, 13 m, 15 m y 17 m respecto al centro de la Lumbra.



**FIGURA 58.** Durante el proceso constructivo de la Lumbra se realizaron los monitoreos de referencias superficiales. En la gráfica se observa que durante la construcción se presentaron distintos asentamientos los cuales en la mayoría fueron ocasionados por las maniobras con equipo de maquinaria pesadas (grúa, cargador, retroexcavadora, etc.), banqueo de material producto de la excavación del núcleo de la Lumbra y descenso de equipos y materiales hacia el interior de la Lumbra. Los mayores asentamientos (del orden de los 14 mm se presentaron en la las referencias más cercanas a la Lumbra.

## 8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS

### 8.1) SOFTWARE

Para el análisis de las lecturas tomadas de los instrumentos de cuerda vibrante e inclinométricos se utilizó un software llamado Inclynalysis, este software fue desarrollado por la empresa RST, ya que los instrumentos utilizados para el desarrollo de dichas lecturas son de la misma marca.

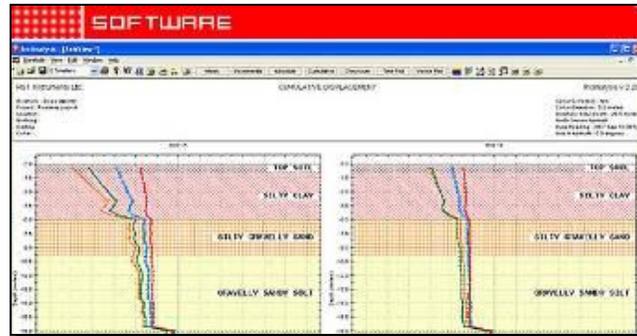


FIGURA 59. Análisis de lecturas con software Inclynalysis, RST (21).

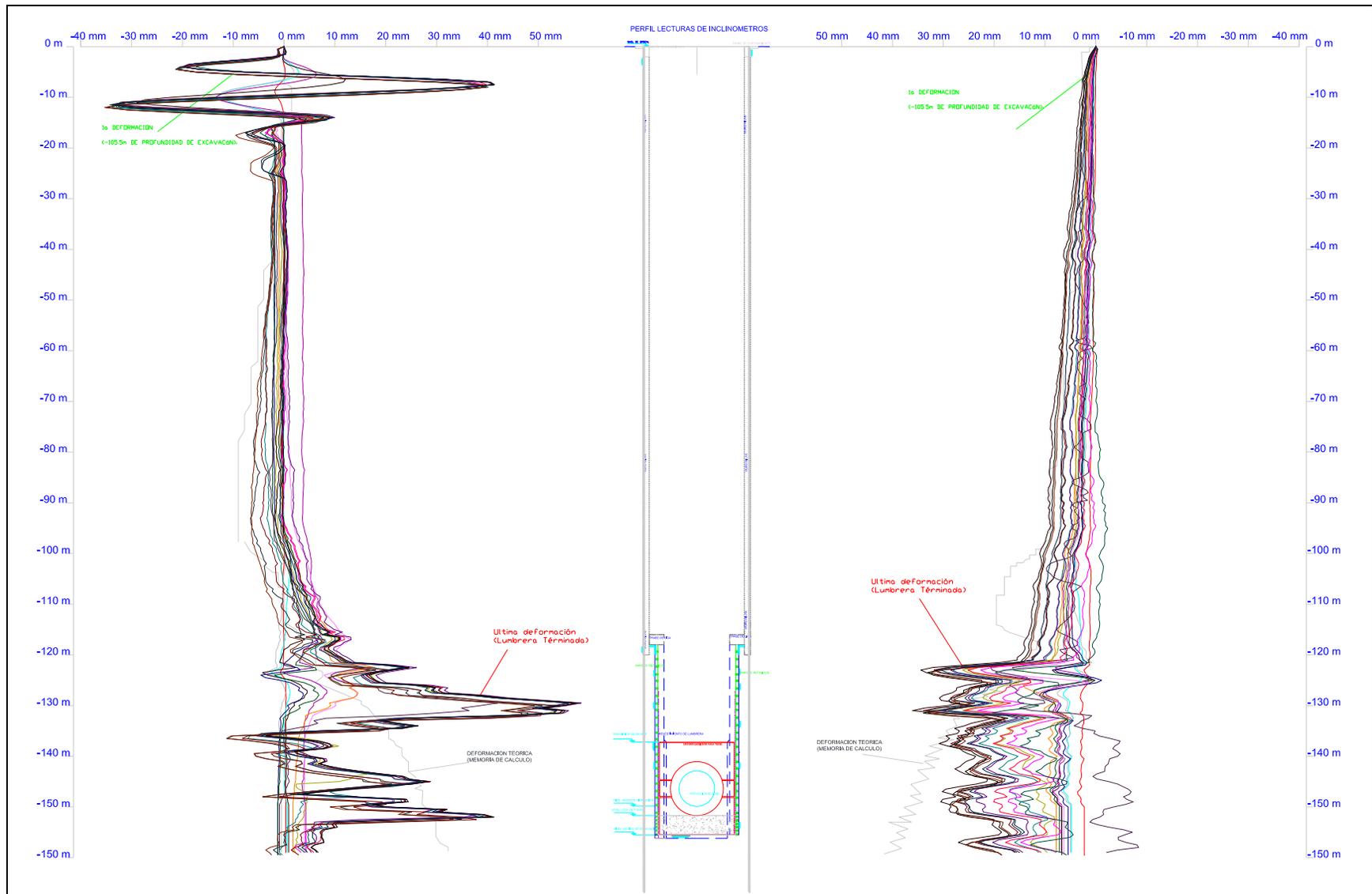
Actualmente en el mercado existen varias compañías que se dedican a la fabricación de instrumentación geotécnica, las cuales a su vez se han dado a la tarea de desarrollar distintos software para la interpretación. Los más comerciales mercados son: Geosoft, GeoKon, Slope Indicator, Geomen, GDS.

Para desarrollar las gráficas para esta tesis se utilizó un software con más uso comercial: Excel y AutoCad.

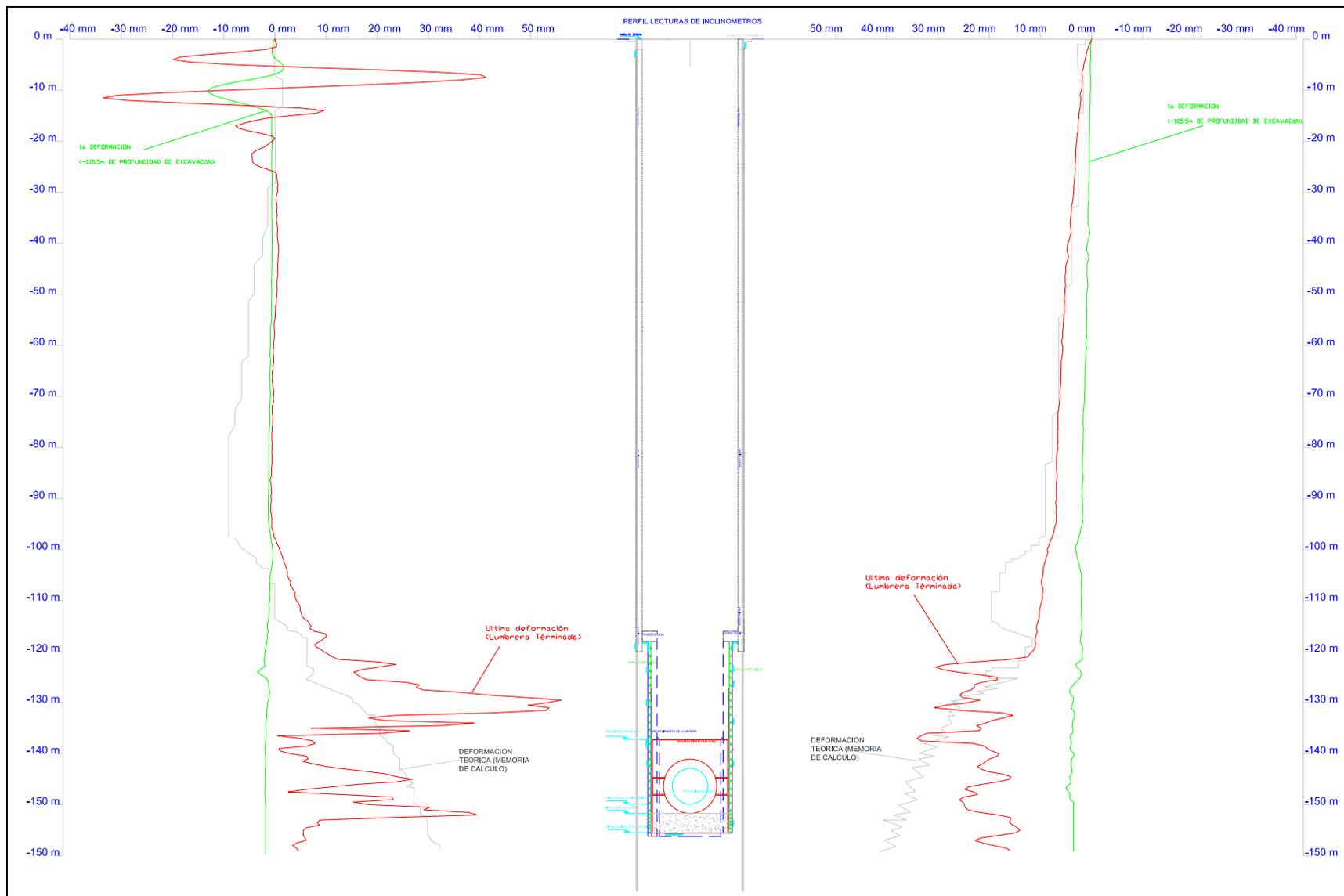
### 8.2) INCLINÓMETROS

En la figura 60 se muestra el comportamiento histórico que tuvieron los Inclinómetros en estudio. En la gráfica se puede apreciar que existe un comportamiento muy similar en cada una de las líneas, lo que significó que estos funcionaron de manera adecuada y respondieron durante todas las etapas de construcción de la Lumbra. De acuerdo a la memoria de cálculo y al hacer la comparativa se observa que los desplazamientos presentados siempre estuvieron dentro de los rangos admisibles; tal y como se esperaba, de acuerdo a la memoria de cálculo, los máximos desplazamientos que se esperaban eran después de la profundidad de los -120 m, profundidad en la cual termina el muro Milán e inicio la etapa de construcción bajo método convencional. Sin embargo y de acuerdo a las gráficas se determinó que siempre se trabajó en condiciones estables del suelo y por ende no se presentaron características o indicio de algún tipo de falla mecánica. Independientemente de las lecturas, en todo momento se hacían inspecciones físicas al muro de la Lumbra.

En la figura 61 se observa se realiza una comparativa con la lectura en donde se presentaron los primeros movimientos. Los desplazamientos que se presentaron en el Inclinómetro instalado en terreno natural, a la profundidad de -10 m a -20 m, se presentaron cuando se inició la construcción y operación del módulo de bombeo, probablemente se asociaron a las vibraciones durante la perforación. Los movimientos presentados a la profundidad mayor de -120 m se asociaron a la excavación del núcleo, cabe recordar que a partir de los -120 m la construcción se realizó bajo método convencional. A pesar de que algunos desplazamientos fueron superiores a los indicados en las memorias de cálculo, durante todo el proceso se realizaron inspecciones visuales y con ello detectar gritas y/o anomalías en la estructura; ver figura 61.



**FIGURA 60.** Comportamiento histórico de los Inclinómetros 1 y 2. Se observa que los desplazamientos más fuertes se presentaron a partir de la construcción de la Lumbrera bajo método convencional. La dirección de los movimientos se presentó hacia el interior de la Lumbrera.



**FIGURA 61.** Comparativa de desplazamientos iniciales vs desplazamientos finales vs desplazamiento teórico; a pesar que en algunas profundidades se presentaron desplazamientos mayores a los teóricos en todo momento se realizaron inspecciones en la estructura y no se detectaron anomalías.

### 8.3) PIEZÓMETROS

En la figura 62 se realiza el análisis e interpretación de las lecturas de la estación piezométrica de la Lumbreira L-20. En el cálculo estructural y diseño geotécnico de la Lumbreira se contempla un NAF a la profundidad de -80.0 m y requería un abatimiento del NAF hasta la profundidad de los -106.0 m. Durante la operación del módulo de bombeo se realizó el monitoreo de los piezómetros instalados, con ellos se observó que se logró abatir el NAF de los -80.0 m a los hasta los -119.65 m, lo cual garantizó la seguridad para continuar con los trabajos de construcción. También se observó que si se suspendía la operación de los módulos de bombeo las presiones se incrementaban por lo cual también nos ayudó a determinar los tiempos para la operación del mismo.

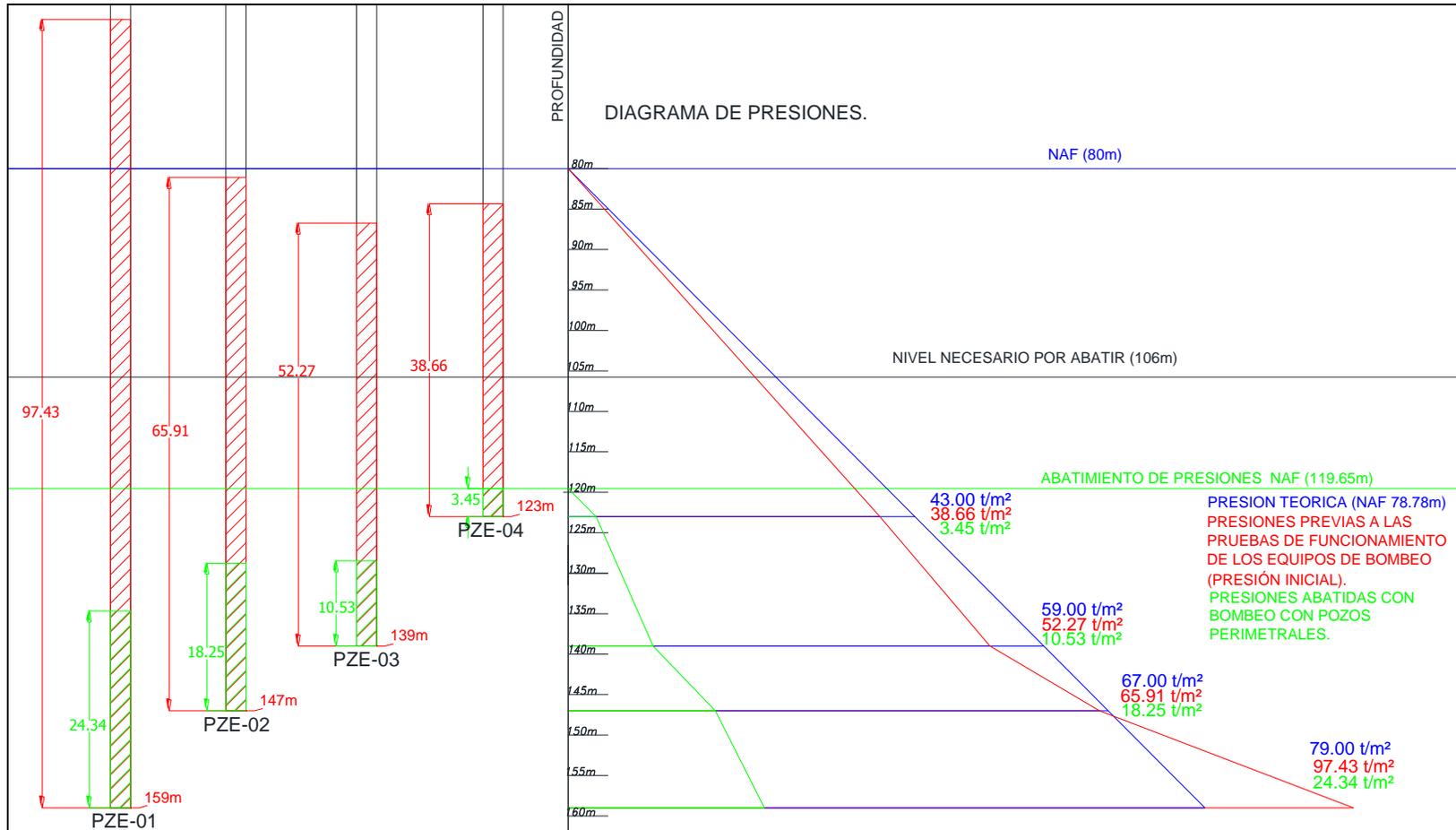


FIGURA 62. Diagramas de presiones previo al bombeo (NAF 80 m) y diagrama después de abatir las presiones (NAF 119.5 m). Se observa que el nivel abatido sobrepasa el nivel necesario por abatir. Esto dio la pauta para poder continuar con la construcción de la lumbreira con seguridad y certeza de que no se presentara una falla.

## 8.4) TUBOS DE OBSERVACIÓN

El tubo de observación instalado en el centro del núcleo de la Lumbreira, nos dio los elementos necesarios para elaborar un procedimiento para la operación más eficiente del módulo de bombeo de esta Lumbreira, es decir, solo se bombeaba la cantidad necesaria para poder continuar con los trabajos en el interior de la Lumbreira, ver figuras 63 y 64. También dio los parámetros para saber en qué etapa de excavación se debía iniciar la operación de los pozos profundos.

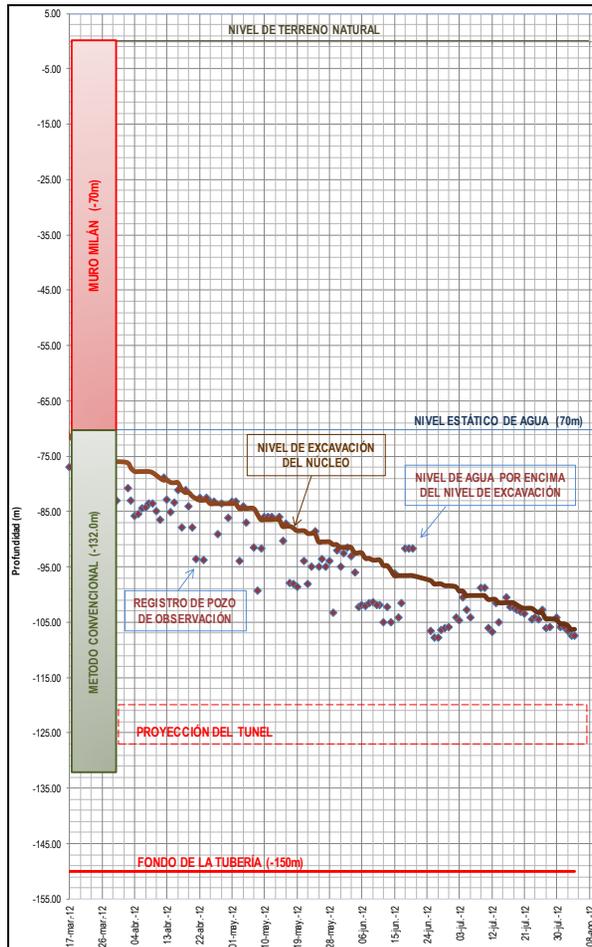


FIGURA 63. Registro histórico de pozo de observación; la línea escalonada representa el nivel de excavación, mientras que los puntos representan los registros del pozo de observación instalado en el centro de la lumbreira.

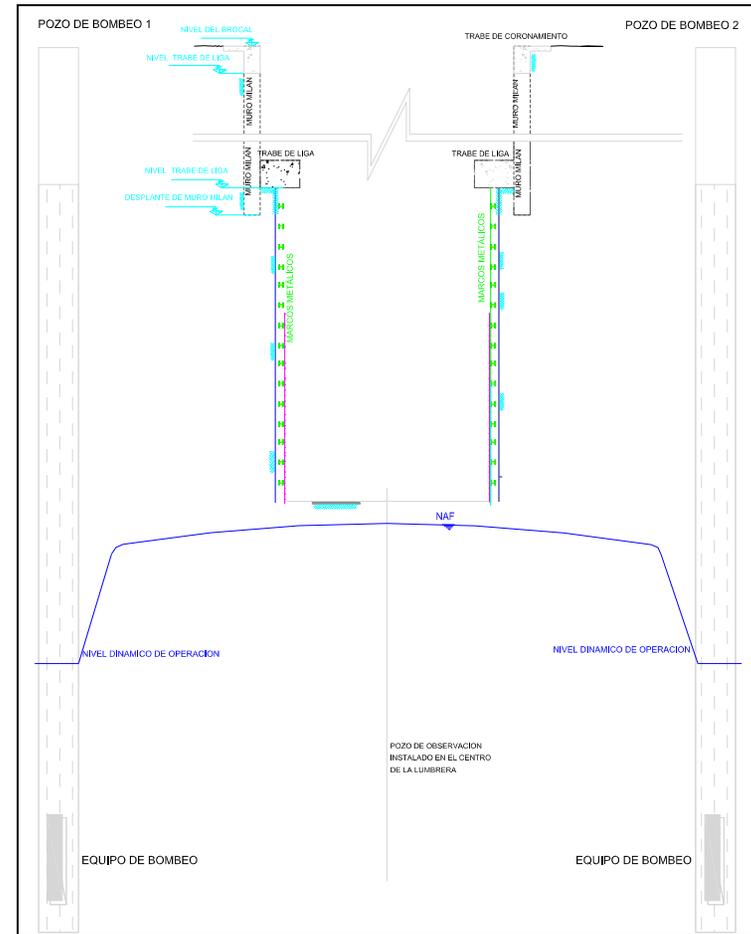
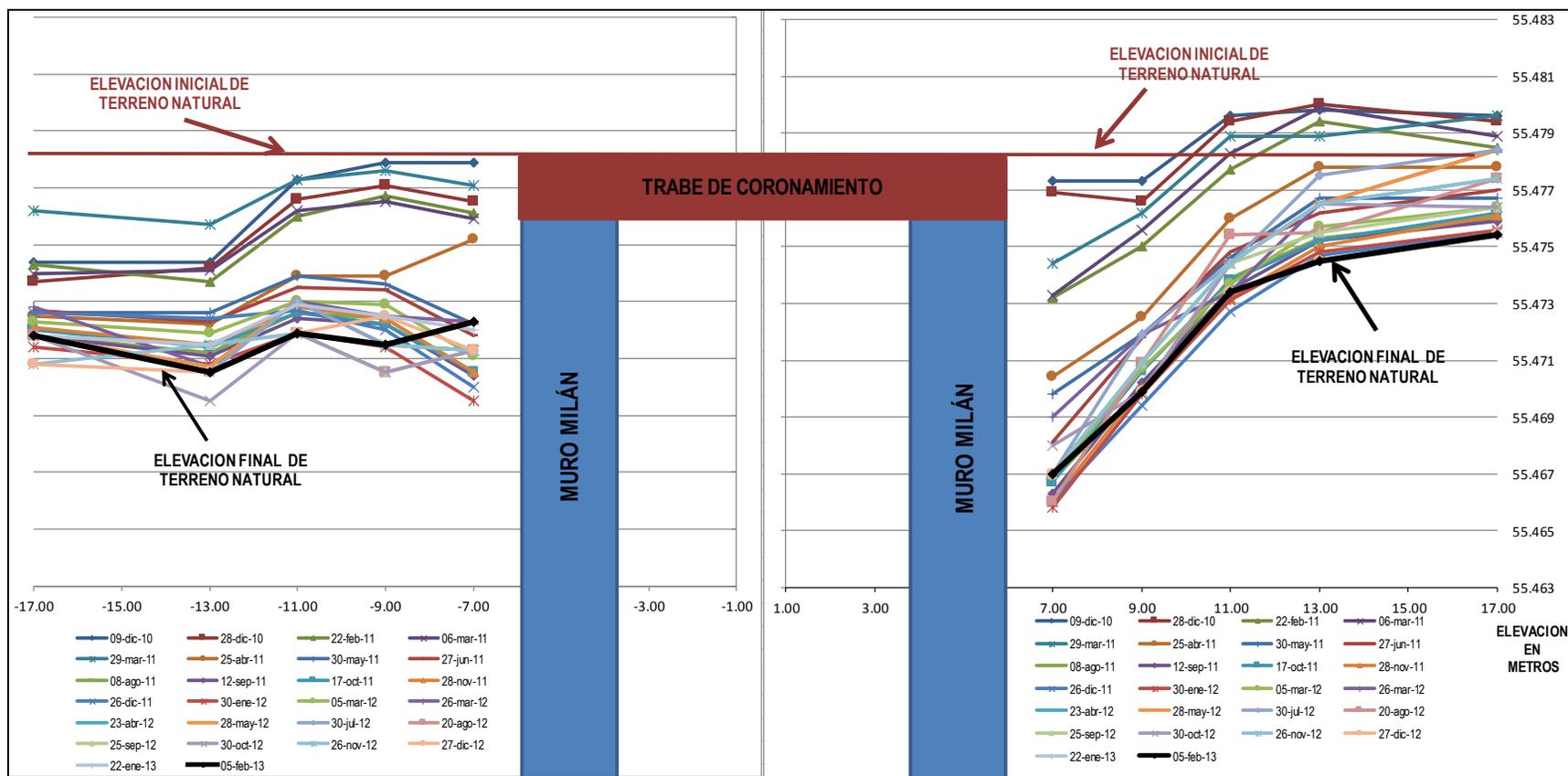


FIGURA 64. Conforme avanza la construcción de la Lumbreira es necesario un abatimiento mayor.

## 8.5) REFERENCIAS SUPERFICIALES.

El monitoreo de las referencias superficiales nos permitían conocer los asentamientos y/o abundamientos del suelo. Si bien en las referencias se presentaron movimientos, nunca sobrepasaron los parámetros permisibles en el diseño geotécnico de la Lumbrera. En las gráficas de resultados se observa que no se presentó algún indicio de falla de flotación, falla de fondo, o falla local en las paredes, ver figura 65. En la figura 66 se indican los asentamientos máximos teóricos vs asentamiento 1ra lectura vs asentamientos máximos presentados; en la mayoría de estas se observa que no se sobrepasaron los parámetros teóricos. Si bien en las primeras lecturas de las referencias del lado derecho se presentaron abundamientos, estos se asociaron al paso de maquinaria pesada sobre las cajas de protección de dichas referencias.



**FIGURA 65.** Durante el proceso constructivo de la lumbrera se realizaron los monitoreos de referencias superficiales. En la gráfica se observa que durante la construcción se presentaron distintos asentamientos los cuales en la mayoría fueron ocasionados por las maniobras con equipo de maquinaria pesadas (grúa, cargador, retroexcavadora, etc), banqueo de material producto de la excavación del núcleo de la Lumbrera y descenso de equipos al interior de la lumbrera. Los mayores asentamientos (del orden de los 14 mm se presentaron en las referencias más cercanas a la Lumbrera.

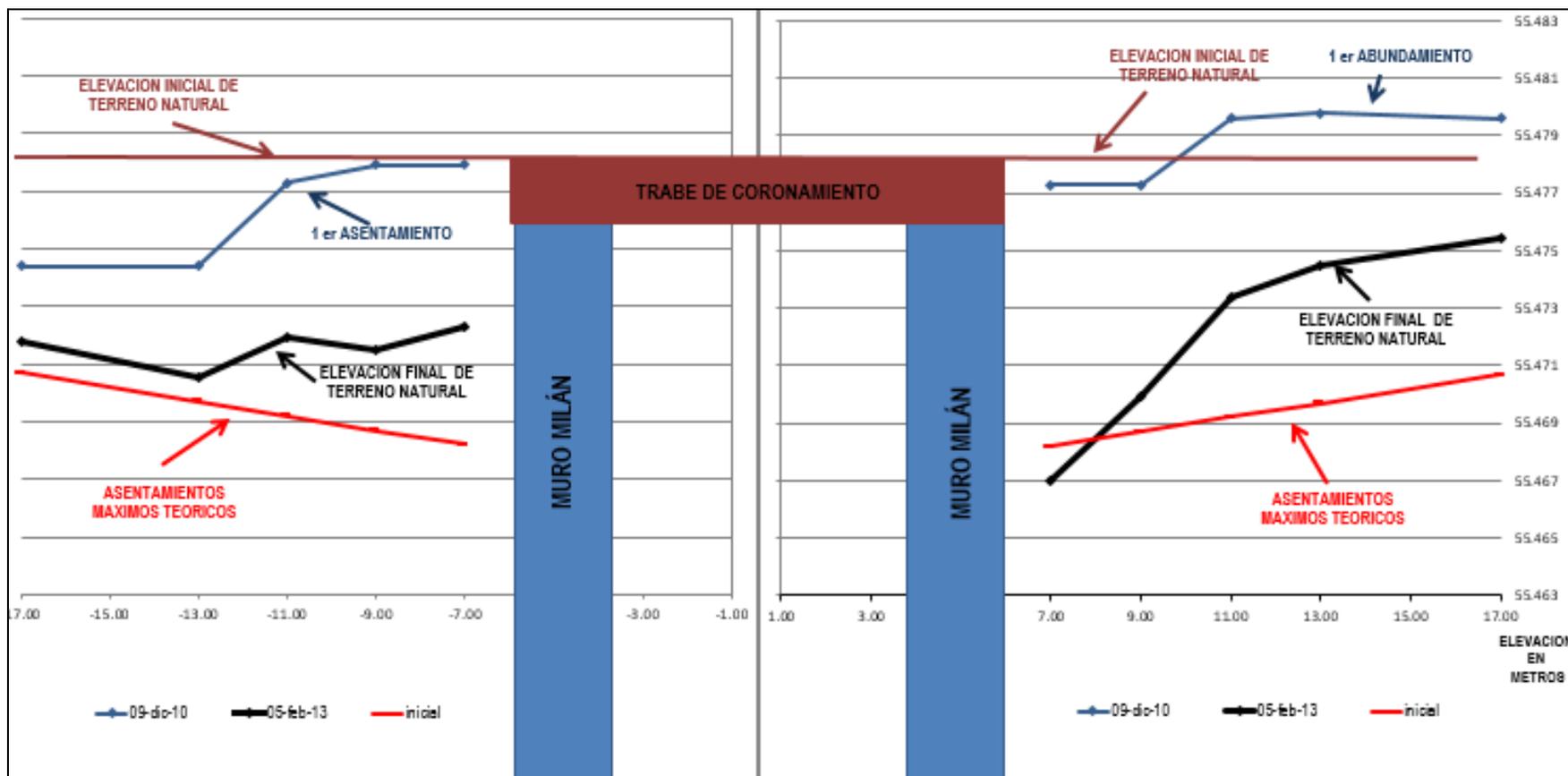


FIGURA 66. Representación gráfica de los asentamientos y/o abundamientos teóricos de acuerdo a las memorias de cálculo vs asentamientos máximos presentados.

## 9. CONCLUSIONES

Como podemos ver en éste trabajo la instrumentación geotécnica sirve para la auscultación de la estructura durante todo el proceso constructivo y ello nos permite garantizar la integridad del personal, maquinaria, equipos y de la misma lumbrera.

Primordialmente es necesario tener bien identificado que es lo que se debe medir, el tipo de instrumento que se debe de instalar, cuando realizar el monitoreo, conocer los parámetros teóricos y el más importante, la interpretación ya que ésta última nos permitirá dar un aviso de alerta para cuando la estructura comience a presentar síntomas de cualquier tipo de falla o un comportamiento no esperado; con ello se pueden tomar medidas correctivas para evitar un daño mayor (y de ser necesario se tendrá que preparar un nuevo diseño de la estructura considerando el nuevo comportamiento y/o tomar en cuenta las condiciones físicas). Otra cosa fundamental es tener la capacitación para el correcto uso de este tipo de instrumentación.

Previo a realizar éste trabajo fue fundamental el aprendizaje obtenido en la Facultad de Ingeniería de la UNAM al cursar las materias ligadas a la mecánica de suelos, y de todas en general, ya que así es más fácil entender e interpretar las mediciones realizadas en campo.

Otra parte fundamental para la instrumentación es que la persona que esté a cargo del área debe estar en constante interacción con los encargados como los jefes de frente, jefes de obra y proyectistas (calculistas) para dar aviso de manera oportuna a todas las partes cuando los resultados de las mediciones presenten algún comportamiento que no sea el esperado o exista tendencia a sobrepasar los límites permisibles (ya sea de presiones y/o deformaciones), en ese momento se debe de poner más énfasis de lo normal para tomar acciones preventivas y correctivas (en su caso).

Uno de los aprendizajes más importantes fue haber encontrado la sensibilidad para realizar la instalación de los instrumentos, y mayor aún informar a todo el personal de la obra la importancia que tienen los mismos, ya que en muchas ocasiones y debido a la gran cantidad que maniobras que se realizan con maquinaria pesada, etc., los instrumentos se encuentran en un riesgo latente de ser dañados y en algunas ocasiones quedar inoperables.

Antes de emitir cualquier reporte, éste debe ser revisado por varias personas no olvidando que los reportes deben de ser breves, claros y concisos ya que de esta manera se garantizará que todas las personas involucradas en el proyecto entiendan en forma simple los resultados. El tener instrumentación instalada en la Lumbrera no exenta que se deban realizar recorridos e inspecciones en la estructura de la Lumbrera. Con la experiencia me pude dar cuenta que para cada etapa del proceso constructivo se le debe dar un seguimiento adecuado y siempre estar al pendiente de cualquier cambio brusco y/o alguna anomalía en las lecturas arrojadas por los instrumentos de medición.

Las instalaciones de instrumentación geotécnica que realice en las Lumbreras del Túnel Emisor Oriente, fueron de gran utilidad en varios aspectos, los principales de ellos fueron:

**Seguridad del personal:** con el apoyo de los resultados de la medición de la instrumentación se verificó la estabilidad del terreno y así se trabajó con mayor seguridad en el frente de trabajo.

**Seguridad de la estructura:** con los distintos instrumentos siempre se verificó la estabilidad de la estructura y/o suelo. Siempre se tuvo la certeza que existieron riesgos mínimos de una falla.

**Medio Ambiente:** con los resultados arrojados por la instrumentación se determinó el sistema de bombeo más eficiente para la Lumbrera L-19, dentro de este sistema se consideró e implemento un sistema de recarga de acuífero (reinyección de agua).

**Diseño Geotécnico:** los resultados ayudaron a retroalimentar a los proyectistas a verificar los comportamientos esperados y en su caso a corregir en los modelos geotécnicos y/o estructurales.

**Costos (daños a la maquinaria):** Los monitoreos de piezómetros y tubos de observación nos ayudaron a determinar qué tan factible era dejar los equipos en el fondo de la Lumbrera, estos por los daños que se verían afectados por una posible falla en la estructura y/o una mala operación en los módulos de bombeo.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- JONH DUNNICLIFF, 1988, Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance, John Wiley And Sons, Inc.
- 2.- ING JORGE E. ALVA HURTADO, Instrumentación Geotécnica de la Presa Pillones, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- 3.- ING MARIO TRIGO, Bancos de Nivel Profundo en la Lumbrera L-05 y L-01, TGC Geotecnia.
- 4.- DR GABRIEL AUVINET GUICHARD, "Diseño y Construcción de Lumbreras en Suelos Blandos por el Procedimiento de los Anillos Prefabricados.
- 5.- JUÁREZ BADILLO, Mecánica de Suelos tomo 1, ed. Limusa
- 6.- IMTA (2001). Geotecnia en Ingeniería de Presas, Coordinación de Tecnología Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México
7. - SLOPE INDICATOR (1994). Application Guide, Second Edition, USA
8. - RST, VW2106 Readout Instruction Manual, RST, CANADA.
- 9.- RST, Instrumentación geotécnica para monitoreo de presas, edificios, cimentaciones, caminos y puentes, RST.
- 10.- TAMEZ, E.; SANTOYO, E.; MOOSER, F., Y GUTIÉRREZ, C., Manual de Diseño Geotécnico. Volumen I, Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR). México, 1987.
- 11.- Folletería de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- 12.- Folletería de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- 13.- TERZAGHI, K., 1943, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley And Sons, Inc.
- 14.- ZEEVAERT, L. W., 1983, Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, Second Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- 15.- ING CESAR PALMA MAYA, 2010, Memoria de Cálculo geotécnico de la Lumbrera L-18 (Proyecto por modificación de la profundidad del muro Milán a 80m), COMISSA.
- 16.- Comisión Federal de Electricidad, Criterio generales para prever tiempos de instalación y frecuencia de mediciones de instrumentos en lumbreras y túnel, a lo largo de todo el trazo.
- 17.- Páginas web: [www.ifai.gob.mx](http://www.ifai.gob.mx), [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx), [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx), <http://www.astm.org>.

## 11. REFERENCIAS

<sup>(1)</sup>GDF (2004), Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Cimentaciones, Gaceta Oficial del D.F., 6 de Octubre de 2004.

- (2) Folletería de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- (3) [http://www.secegsa.gob.es/NR/rdonlyres/92CBAC13-422A-4669-8BD5-6AE10751F070/102692/imagen\\_03.jpg](http://www.secegsa.gob.es/NR/rdonlyres/92CBAC13-422A-4669-8BD5-6AE10751F070/102692/imagen_03.jpg); visto Abril-2014.
- (4) [http://www.distanciometrosleica.com/blog/wp-content/uploads/2012/02/distanciometro\\_laser.jpg](http://www.distanciometrosleica.com/blog/wp-content/uploads/2012/02/distanciometro_laser.jpg); visto Abril-2014.
- (5) [http://www.abreco.com.mx/niveles\\_topografia/nivel\\_topografico1.jpg](http://www.abreco.com.mx/niveles_topografia/nivel_topografico1.jpg); visto Abril-2014.
- (6) <http://us.123rf.com/400wm/400/400/kadmy/kadmy1007/kadmy100700285/7421535-trabajador-agrimensor-medir-distancias-altitudes-y-direcciones-en-sitio-de-construccion-por-equipos-.jpg>; visto Abril-2014.
- (7) <https://www.patologiasconstruccion.net/2015/04/inclinometros-descripcion-uso-y-recomendaciones-2/>; visto Febrero 2017.
- (8) <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ108zgcslpshzpxcbnODbD08o-jUIHh-zEcJHI3fzD64WqrHNk>; visto Abril-2014.
- (9) [http://www.belotti-online.it/upload/7t\\_6fe24518b3b499205ac562e74ef89297.jpg](http://www.belotti-online.it/upload/7t_6fe24518b3b499205ac562e74ef89297.jpg); visto Abril-2014.
- (10) [http://www.juferma.com/imagenesProductos/ap\\_7-12\\_1.jpg](http://www.juferma.com/imagenesProductos/ap_7-12_1.jpg); visto Abril-2014.
- (11) <http://www.suanper.com/visorfiles.aspx?idFichero=4424170123157154143160142159154158138100100138093095091163092099091138155148144165154152144159157154138142160144157143140138161148141157140153159144138154146093091091161162089149155146424170>; visto Abril-2014.
- (12) PRUEBA DE VERIFICACION DE CALIBRACION DE EQUIPOS DE OSCULTACION DEL TEO, COMISSA, 21-JUNIO-2013.
- (13) Croquis de trazo del TEO y ubicación de las Lumbreras (TEO-5-L19-BT-PL-016a, 13-OCTUBRE-2011).
- (14) Plano: sección geológica general del Túnel Emisor Oriente, CNA (TEO-5-T/L-17/20-AD-05, 21-JUNIO-2010).
- (15) Perfil estratigráfico de Lumbreras L-17, L-18, L-19, L-20. L-21 del TEO, Ing. Javier Sanchez.
- (16) Plano instrumentación geotécnica de la Lumbrera L-20 del TEO, CNA (TEO-5-L-20-IN-01).
- (17) Memoria de cálculo geotécnico de la Lumbrera L-18, Cesar Palma Maya.
- (18) Tamez, E.; Santoyo, E.; Mooser, F., y Gutiérrez, C., "Manual de Diseño Geotécnico. Volumen I", Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR). México, 1987.
- (19) Juárez Badillo, E., y Rico Rodríguez, A., "Mecánica de suelos. Tomo II. Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos", Limusa, México, 1980.
- (20) Apuntes de la Materia Mecánica de suelos, Ing Legorreta Cuevas.
- (21) <http://www.rstinstruments.com/Remote/SPLASH%20SOFTWARE.jpg>; visto Abril-2014.