

# Análisis con MEF de secuencias de excavación en lumbreras

José G. Clavellina M., Oscar J. Luna G. & Armando Pantoja S.  
*CIMESA, Geotecnia GIEC-CFE, Geotecnia GIEC-CFE*  
Alonso G. Lira A. & Juan Paulín A.  
*DICIMSA, CIMESA, Mexico*



## ABSTRACT

The construction of tunnels of considerable length requires the creation of vertical accesses to them (shafts), for personnel and equipment such as Tunnel Boring Machines, as well as for ventilation and the removal of waste excavation material. Based on the Túnel Emisor Oriente (TEO), a project currently under construction, this document describes the entry data, the hypotheses, the modeling and analysis results using finite elements of the axisymmetrical type to study the constructive process of shafts, in particular Sections III and IV. In the second part of the document the analysis results are interpreted and compared to the data obtained from the instruments installed to give follow-up to the excavation process. In the conclusions we underscore that an acceptable approximation can be achieved between the numeric models and reality.

## RESUMEN

Para la construcción de un túnel de longitudes importantes es necesario crear accesos verticales (lumbreras) para el personal y los equipos de excavación (como las tuneladoras), así como para la ventilación y rezaga. Con base en el Túnel Emisor Oriente (TEO), un proyecto actualmente en ejecución, el trabajo que se presenta describe los datos de entrada, las hipótesis, la modelización y los resultados de los análisis, usando el método de los elementos finitos en un modelo axisimétrico para estudiar el proceso constructivo de las lumbreras, en particular de los Tramos III y IV. En la segunda parte del trabajo se interpretan los resultados de los análisis y se comparan con los datos obtenidos de la instrumentación instalada para dar seguimiento a la excavación. En las conclusiones se destaca que se puede lograr una aproximación aceptable de los modelos numéricos con la realidad.

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del proyecto

Las lumbreras en el TEO son de dos tipos: las de paso de la tuneladora y rezaga de producto de excavación y las de montaje y rezaga. Las de paso deben tener un diámetro interno no menor de 12 m y las de montaje de 16 m. De las 24 lumbreras, las de montaje son: L0, L5, L10, L13, L17 y L20 (la L0 existía antes de iniciar los trabajos).

Se propone usar como ejemplo de los análisis realizados, la Lumbrera 10, ya que su construcción ha finalizado y en esta lumbrera se construirá la galería de montaje de la tuneladora. La Lumbrera 10 se resolvió con la combinación de dos métodos: desde el nivel de plataforma de trabajo (nivel 0.0 m) y hasta el nivel -45.0 m, a base de muro Milán estructural de 1.0 m de espesor y 20 m de diámetro interior, desde el nivel -45.0 m hasta el nivel máximo de excavación (-76.0 m) mediante método convencional con base en un muro primario de concreto lanzado estructural reforzado con fibra metálica, trabajando en conjunto con marcos metálicos horizontales y un muro secundario colado in situ de 25 cm de espesor para dar un diámetro interior final de 16 m. En la parte superior (nivel 0.0 m) se construyó una trabe de coronamiento que liga estructuralmente los paneles de muro Milán, en la -45.0 se construyó una trabe de liga que integra estructuralmente el muro Milán

y el muro método convencional. La excavación dentro del área confinada por el muro Milán se realizó en frentes verticales cuya altura dependió de los rendimientos de extracción del material, a partir de la -45.0 m los cortes verticales se acotaron a 1.0 m de altura.

La solución anterior se complementó con un sistema de abatimiento a base de 8 pozos profundos, ubicados en el exterior de la Lumbrera, perforados a 85.0 m de profundidad, cada pozo se equipó con una bomba sumergible controlada por electroneveles de inicio y paro de bombeo. El bombeo profundo se complementó con bombeo de achique en el interior de la excavación.

## 2 MODELO GEOTÉCNICO

### 2.1 Descripción de la estratigrafía

La secuencia estratigráfica en el sitio de la Lumbrera 10, de forma general, es la siguiente: desde el nivel de superficie y hasta aproximadamente 5 m de profundidad se localizan arcillas de alta plasticidad y consistencia blanda ( $w = 210\%$ ,  $N_{prom} = 2$ ,  $c = 5 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $E = 500 \text{ t/m}^2$ ); a continuación y hasta 13 m de profundidad se presentan limos poco arenosos, de baja plasticidad, de consistencia blanda a dura ( $w = 40\%$ ,  $N_{prom} = 35$ ,  $c = 7 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 37^\circ$ ,  $E = 2000 \text{ t/m}^2$ ); subyaciendo a la unidad anterior y hasta 20 m de profundidad, se presentan limos de alta plasticidad de consistencia blanda a dura ( $w =$

100%,  $N_{prom} = 15$ ,  $c = 6 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $E = 900 \text{ t/m}^2$ ); a continuación y hasta 26 m de profundidad se detectan limos arenosos muy duros ( $w = 30\%$ ,  $N_{prom} > 50$ ,  $c = 8 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 30^\circ$ ,  $E = 2000 \text{ t/m}^2$ ); de 26 m a 32 m de profundidad se encuentran intercalaciones de arcillas y limos poco arenosos, de consistencia blanda a dura ( $w = 110\%$ ,  $N_{prom} = 12$ ,  $c = 16 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $E = 1300 \text{ t/m}^2$ ); de 32 m a 55 m de profundidad se presentan limos arenosos de consistencia media a muy dura ( $w = 30\%$ ,  $N_{prom} > 50$ ,  $c = 18 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 17^\circ$ ,  $E = 1800 \text{ t/m}^2$ ); a continuación y hasta 68 m de profundidad se encuentran limos arenosos, de consistencia muy dura, con gravas ( $w = 30\%$ ,  $N_{prom} > 50$ ,  $c = 30 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 29^\circ$ ,  $E = 2900 \text{ t/m}^2$ ); finalmente, desde 68 m y hasta 85 m se detectan intercalaciones de limos arenosos y arenas limosas de consistencia media a dura ( $w = 25\%$ ,  $N_{prom} > 50$ ,  $c = 25 \text{ t/m}^2$ ,  $\phi = 23^\circ$ ,  $E = 2600 \text{ t/m}^2$ ).

## 2.2 Condiciones hidráulicas de la masa de suelo

De acuerdo con las exploraciones de campo, el Nivel de Aguas Freáticas se localiza a 6.0 m de profundidad. Sin embargo, las presiones hidráulicas se encuentran muy abatidas, esto es, a la profundidad de 30 m se tiene un abatimiento de aproximadamente el 50% de la presión hidrostática, mientras que a 70 m de profundidad el abatimiento es de prácticamente el 80%.

## 3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS

Para el modelado de la lumbrera se utilizó el programa PLAXIS V8.6, que está basado en el método de los elementos finitos, el cual considera de manera conjunta el comportamiento de los materiales, las condiciones de frontera y las fuerzas externas, para determinar el equilibrio del sistema, a través de una compatibilidad de deformaciones de todos los elementos.

La precisión en la solución del sistema depende del número de elementos finitos considerados en cada zona de análisis, por lo que se requiere una malla de elementos más fina en las zonas de interés para tener una mejor aproximación a la solución real. Asimismo, el considerar elementos de 15 nodos mejora ampliamente la interpolación de los resultados.

En el caso de lumbreras, una manera adecuada de estudiar su proceso constructivo es a través de análisis bidimensionales axisimétricos, dada la forma cilíndrica que tendrá la estructura.

Los suelos fueron modelados como materiales con comportamiento elastoplástico, asignándoles un módulo de elasticidad,  $E$ , y una relación de Poisson,  $\nu$ , para la fase elástica, definiendo la fase plástica con una ley de resistencia Mohr-Coulomb, con parámetros de cohesión,  $c$ , y ángulo de fricción,  $\phi$ . Las propiedades utilizadas en el modelo son las indicadas en el inciso 2.1. Cabe aclarar que para las etapas de excavación convencional con colocación de concreto lanzado y anillos de acero, y debido a que los suelos estarán sujetos a descarga, se

estudió y se propuso incrementar el módulo de elasticidad en un 50%. Esto derivado que en el comportamiento clásico de las pruebas esfuerzo-deformación de suelos, el módulo de elasticidad en el tramo de descarga es del orden del doble que el de carga, por lo que en este caso se considera conservador incrementarlo en un 50%.

Para el caso de los elementos de concreto (muro Milán o concreto lanzado), estos se modelaron como elemento placa (shell) con comportamiento elástico lineal, con un  $E=14000 (f'_c)^{1/2}$  y una  $\nu=0.2$ . Para el caso de la losa de fondo, se ocuparon los clusters de las etapas de excavación final y se consideró un material elástico lineal con un  $E=14000 (f'_c)^{1/2}$  y una  $\nu=0.2$ .

Para simular los anillos de acero (IPR) se utilizó un símil con el elemento ancla fija en un extremo (anchor-end-fixed) considerando una distribución y longitud equivalente unitarias. La rigidez de este elemento se obtuvo con la equivalencia de la compresión de anillo ante una presión uniforme y unitaria; con ello se obtuvo el acortamiento en el perímetro, que se traduce a un acortamiento en el radio y, al tener ese acortamiento y la presión a la cual se acortó, se obtiene una rigidez lineal de resorte.

Todos los elementos placa (muros Milán y concreto lanzado) fueron acompañados de una interfaz de  $R=0.8$ , con el fin de mejorar la interpolación en estos contactos y de considerar una reducción de la resistencia (del 20%) producto de los procesos constructivos.

Las condiciones iniciales antes de estudiar la secuencia constructiva, toman en cuenta la distribución piezométrica del sitio y una relación de esfuerzos efectivos horizontal y vertical ( $k_0$ ) estimada con la expresión de Jaky (1948).

Todas las etapas analizadas fueron realizadas en condiciones estáticas.

## 4 SECUENCIA CONSTRUCTIVA

El procedimiento constructivo modelado como una secuencia, es el siguiente:

- a) Construcción de muro Milán y pozos de bombeo.
- b) Inicio del bombeo.
- c) Excavación del núcleo de la lumbrera hasta la profundidad de desplante de trabe de liga. La excavación en estas etapas está confinada por el muro Milán.
- d) Construcción de trabe de liga.
- e) Excavación del núcleo de la lumbrera hasta la profundidad de desplante de la losa de fondo, En el tramo en que los marcos metálicos tienen separación de 1.0 m, la altura de las etapas de excavación será también de 1.0 m. La excavación en estas etapas tiene la secuencia siguiente:
  - -Excavación vertical sin soporte horizontal.
  - -Colocación de 15 cm de concreto lanzado reforzado con fibra.
  - -Colocación y fijación de marco metálico.

- Colocación de concreto lanzado entre marcos metálicos (30 cm para tener un espesor final de 45 cm de concreto lanzado reforzado con fibra metálica).
  - Excavación del nivel siguiente.
- f) Se considera que toda la secuencia de excavación y construcción de muro, para cada altura de excavación, se realiza en un tiempo de 1 día, por lo que el concreto lanzado colocado en la etapa anterior tiene apenas una resistencia del 50% $f_c$  al momento de excavar la etapa siguiente. Se considera que la resistencia del concreto evoluciona de la forma siguiente: 50% $f_c$ , 65% $f_c$ , 80% $f_c$ , 100% $f_c$ , a los 1, 2, 3 y 4 días respectivamente. Cabe señalar que estos valores de resistencia del concreto son los requeridos por proyecto, por tanto, los considerados en los análisis.
- g) Una vez alcanzado el nivel máximo de excavación, se construye el muro secundario de concreto reforzado (25 cm), en toda la altura del muro método convencional.
- h) Concluido el muro secundario, se construye la losa de fondo.
- i) Una vez construida la losa de fondo se detiene el bombeo y se recuperan en el exterior de la lumbrera los niveles piezométricos. Esta etapa constructiva corresponde a las condiciones que presentará la lumbrera a largo plazo.

## 5 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

### 5.1 Condiciones generales de modelación

El modelo de elementos finitos utilizado para los análisis 2D se consideró axisimétrico con respecto al centro de la lumbrera. Tomando en cuenta que en la proximidad de las paredes de la lumbrera, tanto del muro Milán como del muro de concreto lanzado, se presentan las mayores concentraciones de esfuerzos y de deformaciones, se seleccionó una malla con mayor cantidad de elementos en estas zonas.

Los análisis ejecutados fueron estáticos, en los cuales se consideraron las diferentes etapas de excavación y construcción. Para evitar efectos de frontera, éstas se ubicaron de la siguiente forma: la frontera horizontal a 4 veces el diámetro máximo y la frontera inferior a 4 veces el diámetro de excavación.

Se consideró una sobrecarga en la superficie del equipo de construcción de 3 t/m<sup>2</sup>.

Para fines de análisis, se tomó en cuenta que antes de iniciar la excavación del núcleo de la lumbrera, los niveles piezométricos se encontraban abatidos hasta un nivel inferior al de la profundidad máxima de excavación, tanto en la parte interna como en la externa del muro Milán y del muro de concreto lanzado.

En la profundidad del muro Milán (0 a 45 m de profundidad) se modeló la excavación del núcleo en etapas de espesor correspondiente a cada contacto de estrato identificado, aunque el Factor de Seguridad se obtuvo hasta el nivel máximo de excavación para este muro (45 m). Una vez terminada la excavación del núcleo en la zona del muro Milán, hasta la profundidad de 45 m, se modeló la construcción de la trabe de liga.

En la zona de excavación convencional con colocación de concreto lanzado y marcos metálicos separados a cada metro (entre 45 y 76 m de profundidad), de manera conservadora, se modeló la excavación a cada 2 m, es decir, una etapa corresponde a la colocación de dos marcos metálicos. Para el modelado del concreto lanzado se tomó en cuenta la variación de resistencia a la compresión del mismo con el tiempo de fraguado.

Considerando que se empleará concreto de tipo fraguado rápido, con  $f_c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup>, se estimó que a 1, 2 y 3 días de fraguado se tendrán resistencias del orden de 50%, 65% y 80% del  $f_c$ , respectivamente. En la Figura 1 se muestra la secuencia constructiva del muro de concreto lanzado con anillos metálicos, así como las resistencias del mismo consideradas para cada etapa de análisis.

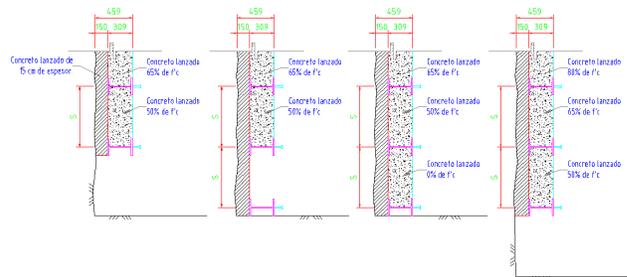


Figura 1. Secuencia constructiva del muro de concreto lanzado con anillos metálicos

Los anillos metálicos fueron modelados como anclas horizontales que por un extremo se considera que están conectadas a la malla y a la placa que simula el concreto lanzado y, por el otro que están fijas.

El modelado de la excavación convencional considerando lo anterior (cada paso dos etapas de excavación) resulta conservador, ya que los esfuerzos y deformaciones obtenidos son mayores para el caso de modelación con una sola etapa de excavación. Asimismo, los Factores de Seguridad obtenidos de esta manera son conservadores en comparación con los que se obtendrían en una modelación de excavación por etapa.

### 5.2 Factores de Seguridad

Se determinaron los Factores de Seguridad (FS) de las principales etapas de construcción, que incluyen:

- Excavación de núcleo en la zona del muro Milán (45 m).
- Inicio de excavación convencional (45 a 47 m).

- Excavación de 51 a 53 m, con separación de anillos de 1 m.
- Excavación de 57 a 59 m, con separación de anillos de 1 m.
- Excavación de 63 a 65 m, con separación de anillos de 1 m.
- Excavación de 69 a 71 m, con separación de anillos de 1 m.
- Fin de excavación, de 75 a 76,55 m, con separación de anillos de 1 m.
- Construcción de muro secundario.
- Fin de construcción (construcción de losa de fondo y recuperación de niveles piezométricos).

Los valores de FS fueron obtenidos con el programa, usando la herramienta "phi/c reduction", en la que realiza una reducción monótonica de las propiedades  $c$  y  $\phi$  del medio, obteniendo como Factor de Seguridad el cociente entre la resistencia original y la resistencia reducida de las zonas que presenta deformaciones excesivas. Los valores de FS se muestran en la Figura 2 y en la Figura 3 los mecanismos hipotéticos de falla para las etapas de excavación a 51m y a 53m.

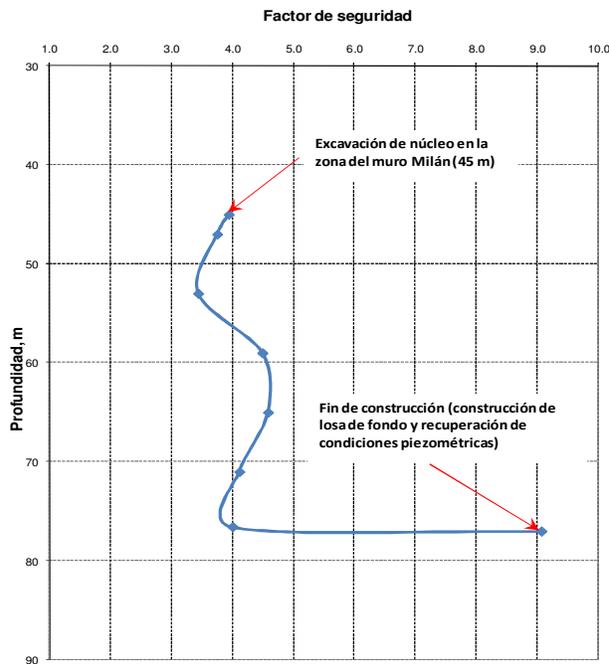


Figura 2. Factores de Seguridad contra Profundidad

### 5.3 Esfuerzos y deformaciones

Para las etapas mencionadas en el inciso 5.2, también se determinaron los desplazamientos horizontales y verticales por fase, siendo los valores máximos de 8.3 cm (hacia el interior de la excavación) y 6.4 cm (expansión), respectivamente.

Cabe señalar que el desplazamiento horizontal máximo (-8.3cm) se presenta en la etapa de excavación convencional entre las profundidades 53 y 55 m; asimismo, el desplazamiento vertical máximo (6.4 cm) se obtiene también en la etapa de excavación convencional, pero entre las profundidades de 73 y 75 m.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de los sitios donde se desarrollan estas deformaciones horizontales y verticales máximas por etapa. En esta misma Figura, se muestran los sitios donde se presentan puntos plásticos.

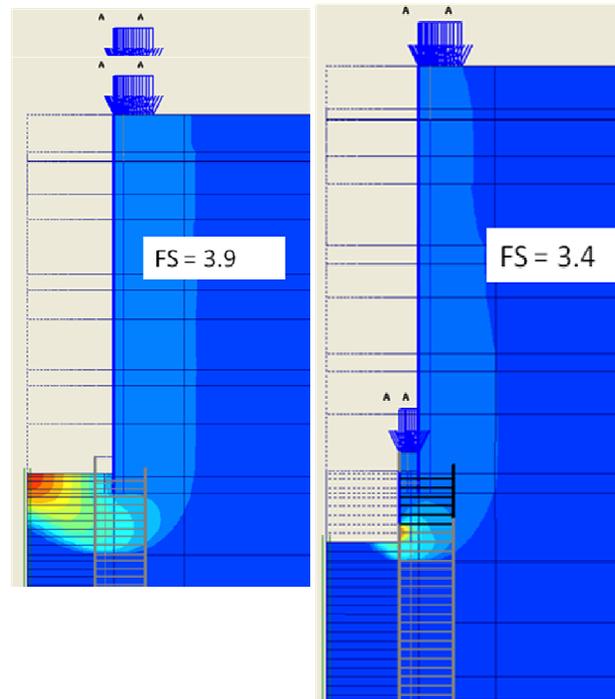


Figura 3. Mecanismos hipotéticos de falla para etapa de fin de la excavación en zona de muro Milán y etapa de excavación de 51 m a 53 m (etapa con Factor de Seguridad mínimo).

Cabe señalar que, de acuerdo con la forma de modelar al suelo (comportamiento elastoplástico con ley de resistencia de Mohr-Coulomb), así como con las consideraciones que el propio programa realiza, se estima que, para los valores de módulo de elasticidad considerados, las deformaciones teóricas obtenidas están sobreestimadas.

## 6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS CON RESULTADOS DE INSTRUMENTACIÓN

Con el fin de analizar de forma continua el comportamiento de la lumbrera durante la excavación y poder compararlo con el estimado teóricamente, se instalaron cuatro inclinómetros, dos dentro del propio muro Milán hasta 45 m de profundidad y dos más dentro del muro Milán y continuando detrás del muro

convencional (aproximadamente a una distancia de 2 m) hasta 85 m de profundidad. Desde el inicio de la excavación y hasta esta fecha en que la construcción de la lumbrera se ha finalizado y se están iniciando los trabajos de construcción de la galería de montaje, se han tomado lecturas de forma semanal. En la Figura 5

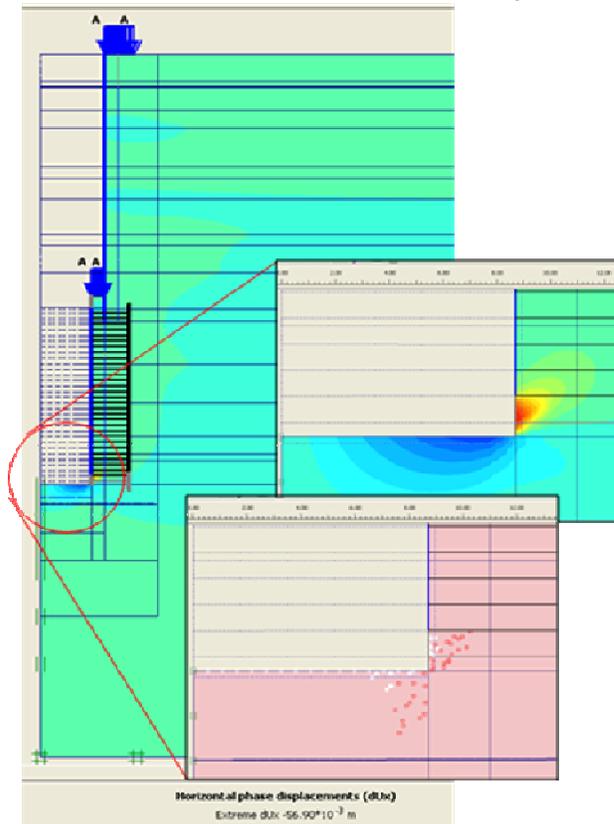


Figura 4. Deformaciones horizontales y puntos plásticos para la etapa de excavación de 75 m a 76 m

En la Figura 6 se presenta la gráfica de desplazamientos en la masa de suelo respecto a la profundidad, obtenidos mediante los análisis con PLAXIS.

Como puede observarse los desplazamientos horizontales máximos estimados son del orden de 4 cm a 70 m de profundidad.

Comparando las Figuras anteriores, los desplazamientos reales registrados mediante lecturas con inclinómetro son ligeramente menores que las estimadas de forma teórica mediante los análisis con PLAXIS.

## 7 CONCLUSIONES

Se han expuesto los análisis realizados para el procedimiento constructivo de las lumbreras, tal como se

se muestran los desplazamientos reales registrados en uno de los inclinómetros mencionados.

Como se puede ver, los desplazamientos reales máximos que se han presentado son de aproximadamente 2.0 cm, hacia el interior de la excavación, aproximadamente a 69 m de profundidad.

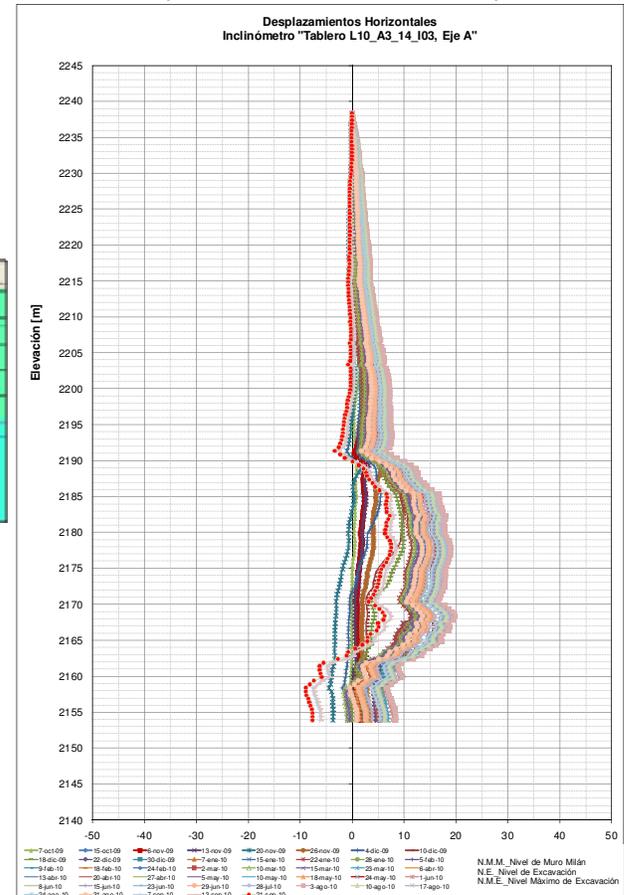


Figura 5. Deformaciones horizontales reales de acuerdo con lecturas de inclinómetro, (en mm)

ejecutaron en la realidad, modelando diferentes aspectos particulares, tales como:

- Sobrecarga en la superficie de la lumbrera, impuesta por el equipo de construcción
- Construcción del muro Milán
- Abatimiento de los niveles piezométricos previo a los procesos de excavación del núcleo

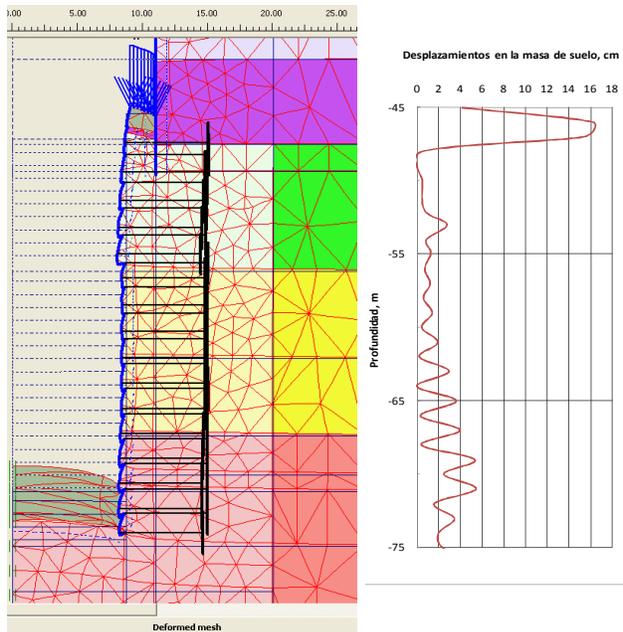


Figura 6. Deformaciones horizontales estimadas mediante análisis con MEF.

- Concreto lanzado, para las diferentes etapas de excavación, con variación de resistencia en función de los tiempos de construcción y del fraguado.
- Modelación de los anillos metálicos para cada etapa de excavación
- Construcción de muro secundario
- Construcción de la losa de fondo.
- Recuperación de los niveles piezométricos una vez que terminó la obra y se suspendió el sistema de bombeo.

Así también, se presentaron los Factores de Seguridad para las principales etapas de construcción y

las deformaciones horizontales para la zona de excavación convencional.

De acuerdo con los registros de lecturas inclinométricas, los desplazamientos reales observados son ligeramente menores que aquéllos estimados mediante los análisis con el método del elemento finito, mostrando una adecuada correspondencia tanto en forma como en magnitud para fines prácticos.

Los análisis de la secuencia constructiva mediante el MEF deben tener el principal objetivo de tratar de comprender, de una forma más clara, el comportamiento de la misma, sin embargo, estos análisis no deben considerarse como el único criterio para evaluar y calificar el comportamiento real de una excavación, ya que se trata de un análisis estrictamente teórico con un modelo idealizado, que sólo se asemejará a la realidad cuando se tenga una adecuada caracterización y modelación del suelo y de las estructuras consideradas.

## 8 REFERENCIAS

- COMISSA 2009, Proyecto Geotécnico y Estructural de la Lumbrera 10 TEO.  
 Programa PLAXIS 2D versión 8.6  
 Jaky J. (1948) Pressure in soils, 2nd ICSMFE, London, Vol. 1, pp 103-107.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos destacar la participación entusiasta y con sentido de equipo, y a la vez agradecer a toda la gente de la CONAGUA y COMISSA que ha participado en los proyectos de las Lumbreras del TEO, desde su concepción, ya que proyectos como este benefician a la sociedad en general y la experiencia ganada a la comunidad ingenieril.