

Falla de una excavación en la zona de Lago de la Ciudad de México Failure of an excavation the Mexico City Lake Zone

Saraid SANTAMARIA¹, Walter I. PANIAGUA²

¹Pilotec S.A. de C.V.

²Pilotec S.A. de C.V.

RESUMEN: Se presenta el caso de una falla en el proceso de excavación para un desarrollo de diecisiete niveles de departamentos en la zona de lago de la Ciudad de México y el comportamiento del muro milán como estructura de contención. Se resalta la importancia de llevar a cabo correctamente el procedimiento constructivo en cada una de sus etapas.

ABSTRACT: The failure case in the excavation process in the construction of a 17 floor building in the Mexico City Lake Zone is presented. Slurry Wall is proposed as a containment structure. Emphasis on the constructability process to every single stage is highlighted.

1 INTRODUCCIÓN

Se proyecta construir un edificio de 17 niveles y 2 sótanos, en la zona de Lago de la Ciudad de México, desplantado en un área de aproximadamente 958 m².

La cimentación es mediante un cajón parcialmente compensado. Para la construcción del cajón de cimentación, el proyecto de excavación se dividió en tres etapas y su estructura de contención es con base en un muro Milán, apuntalado con troqueles de tubo de acero, para realizar la excavación en seco, se proyecta un sistema de bombeo con puntas eyectoras; sin embargo, dicha excavación falló cuando estaba por concluirse la segunda etapa.

En este trabajo se muestra la falla de la excavación, y se plantean algunas posibles causas que la ocasionaron. Asimismo, se destaca la importancia de seguir cuidadosamente las recomendaciones geotécnicas para el sistema de apuntalamiento.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El edificio tiene un área de 958.24 m², colinda en el Norte con estructuras de dos y cinco niveles, así como una casa catalogada; al Poniente, con edificios de dos y tres niveles; en el Sur, con casas catalogadas por el INBA y en el Oriente, con una vialidad, Figura 1.

El proyecto consta de un edificio de 17 niveles y 2 sótanos, con una cimentación parcialmente compensada, formada por un cajón estructurado con una losa de fondo, contratraves y una losa tapa o superior, que constituye el sistema de piso de la planta baja de la estructura. Adicionalmente, se considera la construcción de un lastre de concreto en el extremo poniente de la losa fondo con un espesor de 40 cm. Como protección a colindancias se recomendó colocar en el perímetro del predio un muro pantalla (muro Milán) desplantado hasta 14.50 m, apuntalado de lado a lado, Figura 2.

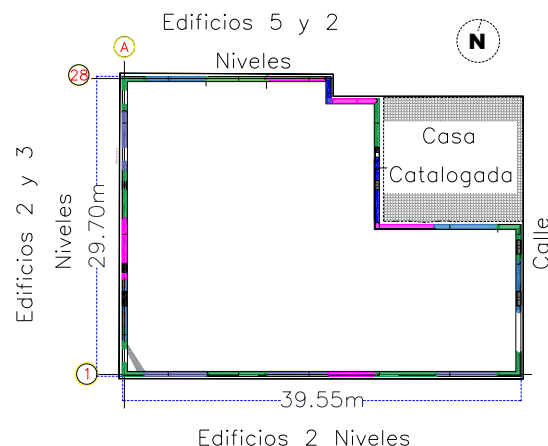


Figura 1. Planta del proyecto.



Figura 2. Corte transversal

3 INFORMACION GEOTECNICA

3.1 Zonificación

De acuerdo con el reporte geotécnico el proyecto se encuentra en la Zona Geotécnica III (a) o de Lago (Figura 3), de acuerdo a la Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones.

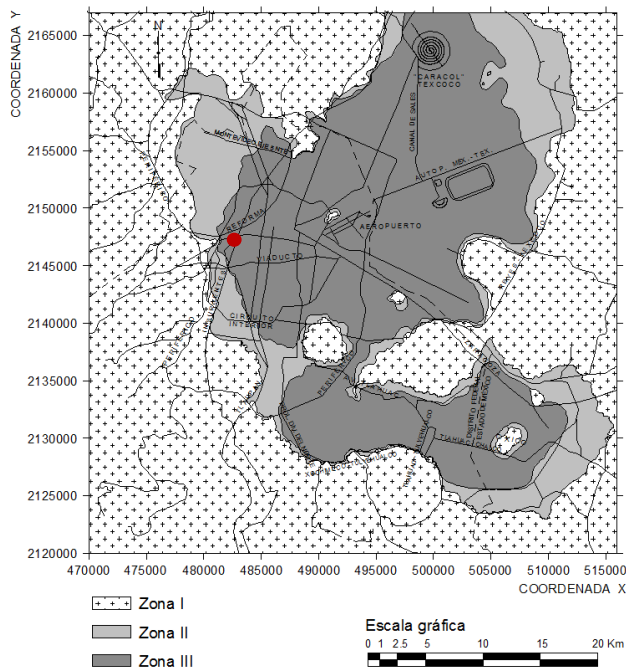


Figura 3. Ubicación del proyecto dentro de la zonificación geotécnica de la Ciudad de México

3.2 Estratigrafía y propiedades

Para determinar las condiciones estratigráficas, así como las propiedades índice y mecánicas del suelo, se realizó un sondeo de tipo mixto, hasta una profundidad de 50.21 m, con obtención de muestras alteradas e inalteradas; un sondeo de cono eléctrico hasta 39.10 m de profundidad, registrando la resistencia de la punta cada 10 cm; 4 calas hasta la profundidad de desplante de la estructura catalogada y 4 pozos a cielo abierto hasta una profundidad máxima de 1.50 m.

De acuerdo a la exploración geotécnica realizada se encontró la costra superficial hasta 1.80 m; seguido de la Formación Arcillosa Superior de 1.80 a 35.00 m, que se caracteriza por baja resistencia y alta deformabilidad; debajo de la serie arcillosa, con espesor aproximado de 1.20 m se encontró la Capa Dura, formada por un limo gris verdoso con arena fina; subyaciendo a dicho material se encontró la Formación Arcillosa Inferior, que consta de limo gris verdoso con arena fina y lentes de grava, registrando un numero de golpes creciente y por último se detectaron los Depósitos Profundos a partir de los 40.00 m de profundidad. La profundidad del nivel de aguas freáticas se encontró a 1.50 m. La velocidad de hundimiento regional reportada, es de 5 cm/año. En la Tabla 1 se muestra la estratigrafía de diseño.

EST	DE (m)	A (m)	w %	γ_m t/m ³	C _u t/m ²	ϕ °	DESCRIPCIÓN
I	0.0	2.5	56	1.50	1.0	30	Limo café oscuro con poca arena fina.
II	2.5	3.0	54	1.50	1.0	30	Arena fina a media de color gris con lentes de arcilla.
III	3.0	4.5	125.1	1.34	3.0	0	Arcilla de color café oscuro con lente de arena fina.
IV	4.5	6.5	215	1.22	3.0	0	Arcilla de color café de varias tonalidades y poca arena fina.
V	6.5	9.0	344	1.14	0.0	33	Arcilla de color café rojizo con poca arena fina.
VI	9.0	11.5	90	1.65	4.0	15	Limo de color gris con lentes de arena fina y vidrio volcánico.
VII	11.5	12.5	150	1.27	3.0	0	Arcilla de color café con poca arena fina.
VIII	12.5	16.5	205	1.18	2.7	0	Arcilla de color café con poca arena fina.

Donde:

w contenido de agua

γ_m peso volumétrico del suelo

C_u resistencia no drenada

ϕ ángulo de fricción

Tabla 1. Estratigrafía de diseño.

4 PROYECTO DE CONTENCIÓN Y APUNTALAMIENTO

4.1 Muro Milán

Como medida de contención en las paredes de la excavación y como protección de las colindancias, se realizó la construcción de un muro Milán de 40 cm de ancho y 14.50 m de profundidad. Inicialmente, se construyeron brocales guía de concreto reforzado. La excavación del muro se realizó utilizando una grúa y una almeja mecánica de caída libre y para la estabilización de sus paredes se utilizó lodo bentonítico; posteriormente, se colocó el acero de refuerzo dentro de la excavación y el concreto se colocó por medio de tubería tipo *tremie*, con una resistencia de $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$ y revenimiento de 18 cm. El muro Milán se dividió en 25 paneles primarios y secundarios, utilizando juntas metálicas circulares para los paneles primarios.

Una vez concluida la construcción del muro perimetral, se construyó una trabe de coronamiento perimetral de concreto reforzado, de 1.20 m de altura con una longitud total de 138.50 m.



Figura 4. Construcción del Muro Milán

4.2 Sistema de Bombeo

El sistema de bombeo, estuvo formado por 16 pozos de bombeo de 30 cm de diámetro y 15 m de profundidad. El sistema consistió en puntas eectoras que comenzaron a operar dos semanas antes de iniciar los trabajos de excavación; asimismo, se construyeron 3 pozos de observación, figuras 5, 6 y 7.

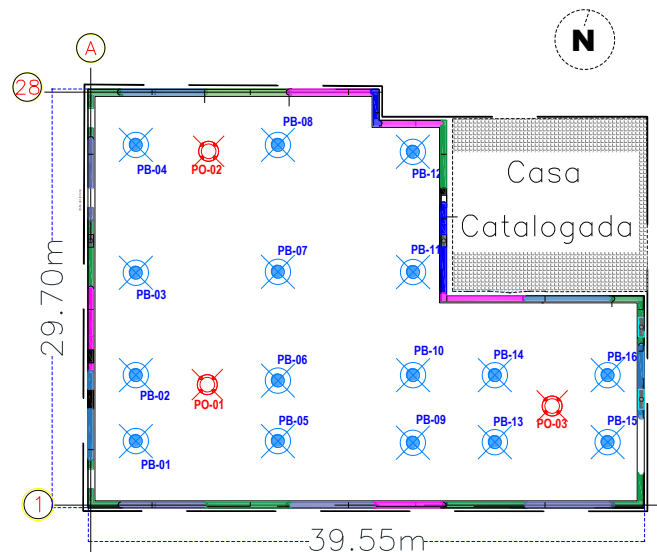


Figura 5. Ubicación de los pozos de bombeo y observación.



Figura 6. Sistema de bombeo.



Figura 7. Pozo de bombeo en el sitio. Al fondo, trabe de coronamiento en proceso de construcción.

4.3 Etapas de excavación

Etapa 1. Se excava toda la superficie del predio, hasta el nivel -3.0m. Se procede a colocar el primer nivel de puntales, a -2.0m en la totalidad del predio.

Etapa 2. En la zona Norte del predio, se excava hasta -5.0m, y se coloca el segundo nivel de puntales. Se excava hasta -8.0m y se coloca el tercer nivel de puntales. Posteriormente, se construye el cajón de cimentación en esta zona: plantilla, dados, contratrabes, losa de fondo, muros perimetrales, columnas y losas de sótano.

Etapa 3. Se realiza la excavación, apuntalamiento y construcción de elementos estructurales, en el resto del predio.

4.4 Sistema de apuntalamiento

Como sistema de apuntalamiento se utilizan troqueles de tubo de acero cédula 30 y 40 de 12", 14" y 16" de diámetro colocados en tres niveles (-2.0 m, -4.5 m, y -7.5 m), figuras 8, 9 y 10.

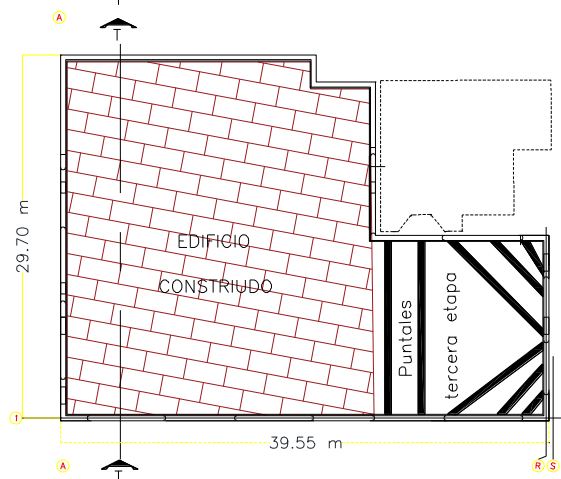
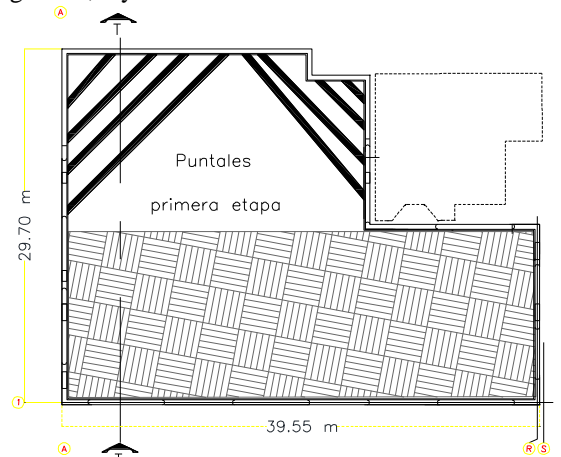
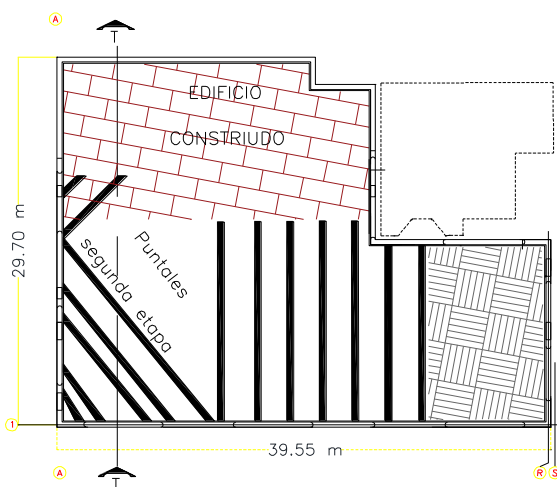


Figura 8. Etapas de troquelamiento.

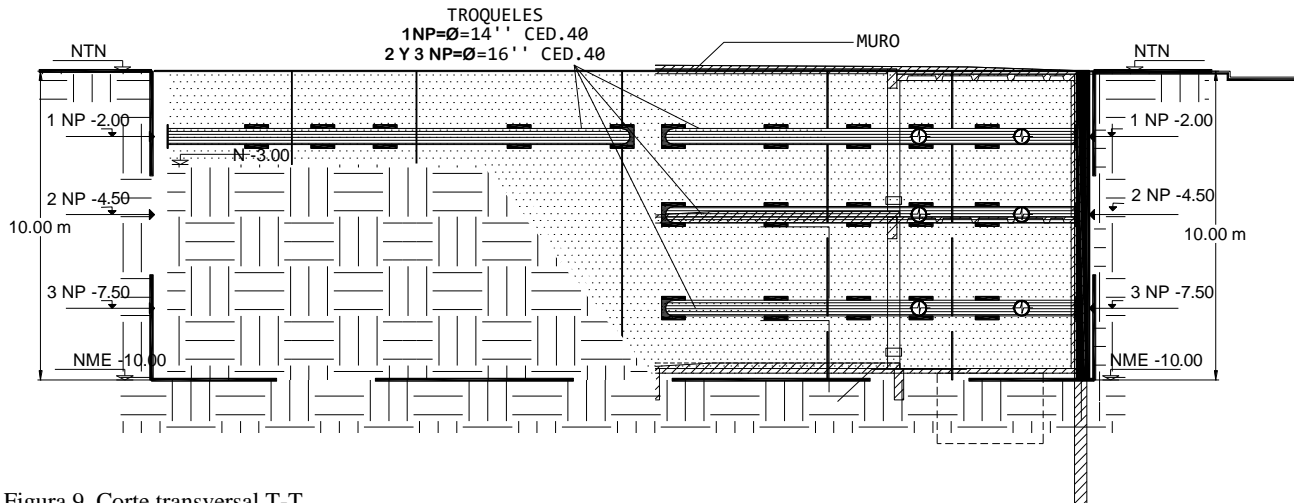


Figura 9. Corte transversal T-T.



Figura 10. Troquel de acero fijado con placa y tornillos al muro Milán.



Figura 11. Excavación previa a colocar los troqueles del tercer nivel.

5 FALLA DE LA EXCAVACIÓN

5.1 Antecedentes

Se llevó a cabo la primera etapa de excavación, sin mayores contratiempos. Durante la segunda etapa de excavación, una vez colocados los puntales del segundo nivel con una pre-carga de entre 10 y 11 t en la primera etapa de excavación, el proyecto se suspendió temporalmente, por lo que se decidió suspender también los trabajos de bombeo, como medida de protección a las colindancias.

Después de 90 días, se reanudó el proyecto y una semana más tarde se aumentó la precarga en dichos puntales hasta 15 t; dieciocho días más tarde, se comenzó la colocación de los troqueles en el tercer nivel, de acuerdo con el procedimiento de excavación.

Durante la excavación de la segunda etapa, el constructor extendió la zona de excavación, sin la colocación de los troqueles (desviándose del procedimiento indicado), Figura 12.



Figura 12. Desviación del procedimiento de excavación.

5.2 Falla en el sistema de troquelamiento

Después de la excavación ampliada, uno de los puntales del segundo nivel (-4.50 m) perdió apoyo, soltándose los tornillos de sujeción y posteriormente las placas de apoyo entre el puntal y el muro Milán (Figuras 13 y 14).

Al revisar la posición de la corona del muro Milán, se advierte que el muro del eje "A" se desplazó 1.50 cm hacia afuera de la excavación; aproximadamente 1.5 horas después, cayó otro puntal del segundo nivel y de la misma área que el anterior.

Finalmente, 40 minutos después cayeron los dos troqueles más largos del primer nivel, ubicado en la misma zona además de que las placas que quedaban colocadas, ya habían perdido algunos tornillos, del mismo modo que previamente lo hicieron los troqueles que ya habían caído. La secuencia se muestra en la figura 13.

5.3 Medidas de emergencia

Para proteger las colindancias se relleno la excavación que estaba por llegar a su nivel máximo (-10.0 m) con diversos materiales: material producto de excavación, escombro, material inerte.

Por otro lado, las edificaciones vecinas, fueron desalojadas, como precaución.

Además, se suspendieron los trabajos de excavación, troquelamiento y bombeo.



Figura 13. Secuencia de caída de troqueles.



Figura 14. Placas vencidas de los puntales de acero.



Figura 15. Tornillo utilizado para sujetar las placas al muro

5.4 Comportamiento del Muro Milán.

Se presentaron desplazamientos considerables en el muro después de la falla del apuntalamiento, con un máximo de 13 cm hacia adentro de la excavación, pero también de 11 cm hacia afuera de la misma, en el eje perpendicular, Figuras 16 y 17.

Después de que se efectuó el relleno mencionado en el apartado anterior, los desplazamientos se detuvieron.

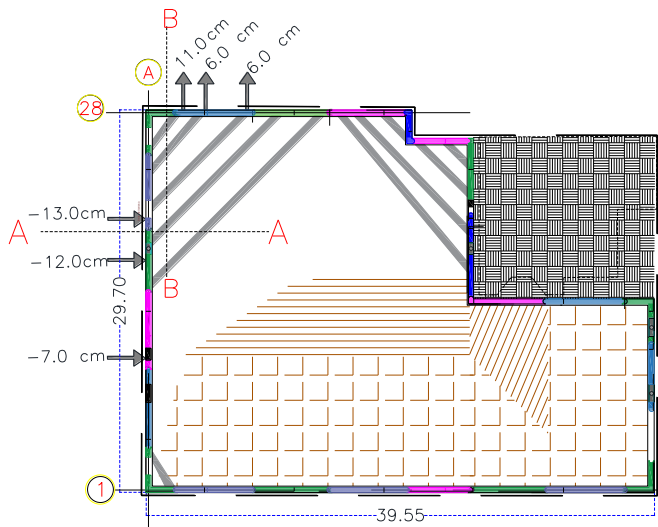


Figura 16. Planta con desplazamientos marcados.

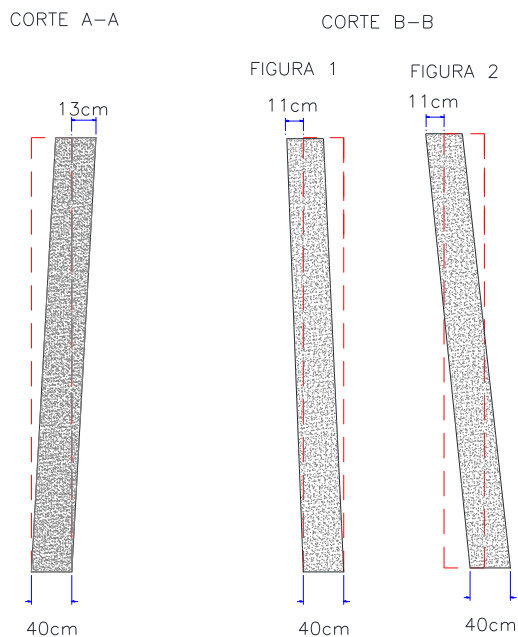


Figura 17. Desplazamientos del muro milán.

6 COMENTARIOS FINALES

Se presentó la falla de una excavación realizada para la cimentación de un edificio de diecisiete niveles con dos sótanos, utilizando como estructura de contención un muro milán, apuntalado con troqueles de tubo de acero.

Sobre las posibles causas de esta falla se generaron las siguientes hipótesis:

- El proceso de excavación se desvió de lo indicado en el estudio geotécnico, en cuanto a la geometría de los taludes y cortes, marcados en las etapas de excavación del proyecto.
- Se aplicó una precarga adicional a los puntales, lo que pudo exceder la carga de diseño de los elementos estructurales de sujeción al muro Milán. Adicionalmente, existe la posibilidad de que se haya utilizado equipo mal calibrado.
- Falta de atención adecuada al proceso de apuntalamiento; por ejemplo, en la correcta colocación de las placas, verificación de la magnitud de la precarga, el monitoreo del comportamiento del muro milán. Esto pudo haberse presentado, debido a la premura en la realización de estos trabajos.

Finalmente, se concluye que aun cuando existen varias posibles causas que provocaron la falla de la excavación, en este caso se resalta la importancia de conservar el proceso constructivo indicado en el proyecto, así como mantener una supervisión geotécnica constante durante la etapa de excavación.



Figura 18. Vista superior del proceso de excavación y apuntalamiento.