

Diseño y construcción de foso con muro Milán para silo de almacenamiento de grano

Design and construction of pit with slurry walls for grain storage silo

Walter Paniagua, Pilotec
Enrique Ibarra, inGeum
Asael Elvira, Pilotec

RESUMEN: En el norte del Valle de México se construyó un silo circular de 18.2m de diámetro, en suelos con alta compresibilidad, sujetos a hundimiento regional. La losa base del silo de almacenamiento se desplantó por 15m por debajo de la superficie del terreno natural, ya que contempla un foso para almacenamiento adicional de grano de trigo. En este trabajo se describe el diseño de la cimentación y la excavación, así como el procedimiento constructivo de los muros para la contención de la excavación y la excavación del foso del silo, que se llevó a cabo sin apuntalamiento.

ABSTRACT: At the north of the Valley of Mexico, a circular silo of 18.2m in diameter was constructed, in soils with high compressibility and with land subsidence. The foundation slab was built 15m below the surface level, to include a pit for additional grain storage. This paper describes the foundation and excavation design, as well as the construction procedure for slurry walls and pit excavation, which was performed without anchors or inner struts.

1 INTRODUCCIÓN

En el norte del Valle de México, se construyó un silo para almacenamiento de harina de trigo, el cual se cimentó con una losa y muros Milán, en un predio ubicado en la Colonia Industrial Vallejo, al Norte del Distrito Federal, figura 1.1.

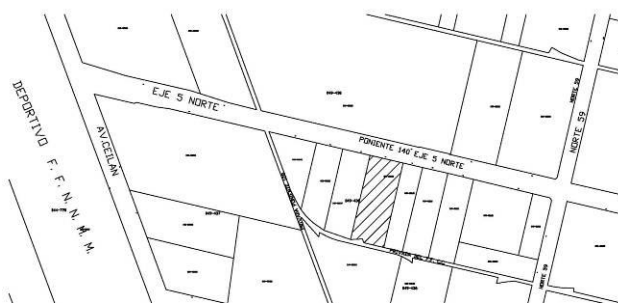


Fig. 1.1, Localización general del sitio

El proceso constructivo del silo permitió la ejecución de la excavación en una sola etapa, sin apuntalamiento de la misma.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se contempla la construcción de un silo circular de 18.2m de diámetro (17.4m de diámetro interior efectivo para almacenamiento).

La losa base del silo de almacenamiento se desplantó 16m por debajo de la superficie del terreno natural, formando un foso para almacenamiento adicional de harina.

El foso se construyó con muros Milán, con 40 cm de ancho y una profundidad de 16 m.

Por motivos de operación, se prevé la construcción de un túnel a 3m aproximadamente por debajo del nivel de la losa fondo del silo; por este túnel se extraerá el material almacenado.

El túnel es de 2.5m de anchura y 3.0m de altura, partiendo del centro del silo hacia la periferia. Adicionalmente se contempla la construcción de una escalera para ingresar al túnel, desarrollándose en un área adyacente al silo de 4.14 m de anchura por 6.2m de longitud, en la figura 2.1, se muestra la elevación y planta del silo.

3 CONDICIONES GEOTÉCNICAS

3.1 Zonificación geotécnica

En la Figura 3.1 se muestra la zonificación geotécnica del valle de México (Auvinet et al, 2005), donde se observa que el sitio en estudio se ubica en la zona II (zona de transición) muy cerca de la frontera con la zona III (zona lacustre). La zona de lago está integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla.

Estas capas arenosas son por lo general son medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos superficiales, en donde el espesor de este conjunto puede ser superior a 50m; mientras que la zona de transición se caracteriza por presentar estratos arcillosos muy plásticos y deformables, cuyos espesores son menores de 20 m.

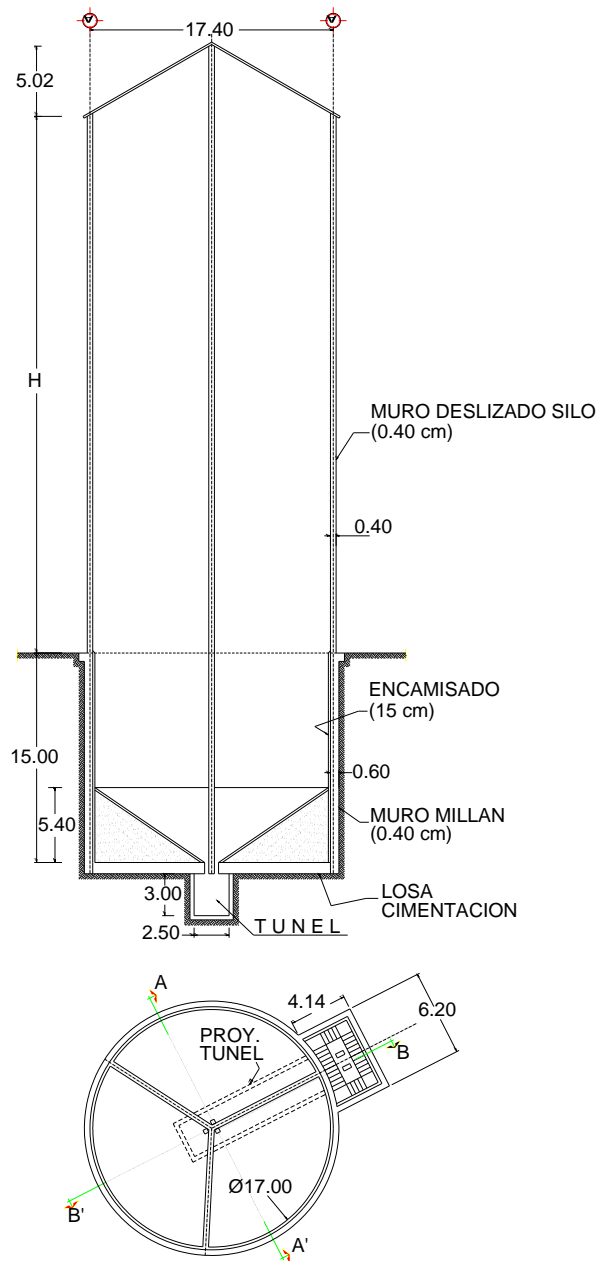


Fig.2.1, Elevación y planta del silo

3.2 Hundimiento regional

El hundimiento regional en la zona de estudio, con base en la información registrada a partir del año 1862 hasta el año 2005 (registros más recientes), muestra que el sitio tiene un hundimiento regional absoluto en este periodo de tiempo de 2m, del cual podemos manifestar que el hundimiento regional anual es de 1.4cm/año.

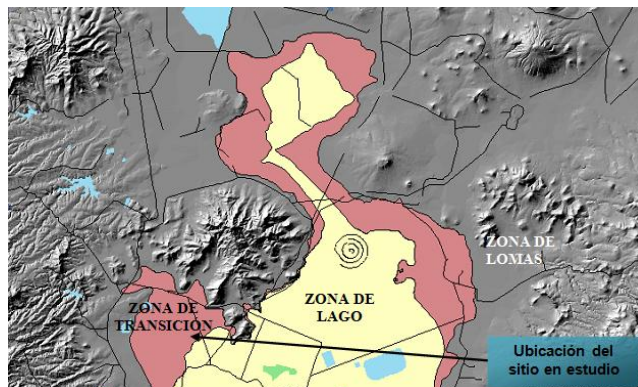


Figura 3.1 Zonificación geotécnica (Auvinet et al, 2005)

3.3 Estratigrafía del sitio

La estratigrafía se puede resumir de la siguiente manera:

Superficialmente, con espesor medio de 2m., se encontraron rellenos arcillo-limosos con pocas raicillas y contenidos de agua medios de 48%.

Bajo los rellenos superficiales y hasta 13.0 m de profundidad, se detectaron limos arcillosos MH con lentes arenosos delgados y de diferentes espesores; los colores varían entre el café claro y el gris verdoso, su consistencia va de muy blanda a media, aumentando la resistencia a la penetración cuando aumentan los porcentajes de arena, su contenido de humedad es muy variable por la errática presencia de los horizontes arenosos. El peso volumétrico varía entre 1,158 y 1,424 kg/m³, la cohesión entre 4.2 y 7 t/m² y el ángulo de fricción interna entre 4 y 11°.

De 13 a 18m de profundidad, con espesores de 5m, se detectaron limos arenosos MH interestratificados con arenas limosas, de color café claro a gris verdoso, de consistencia dura y con contenido natural de agua medio de 40%. Los porcentajes de arena alcanzan hasta 63%, la cohesión es de 7 t/m², el ángulo de fricción interna de 33° y el peso volumétrico medio es de 1,650 kg/m³.

Subyaciendo a los materiales antes mencionados y hasta la máxima profundidad explorada (25m), se detectaron depósitos areno-limosos con contenidos muy variables de arena fina y con tonalidades variables entre gris, gris

verdoso y café claro, su compacidad relativa es muy compacta y la clasificación de la fracción fina es MH.

Su contenido de humedad medio es de 34% y el contenido medio de arena es mayor que el 50%, aumentando a partir de los 24.50 m de profundidad. La cohesión es de 7.20 t/m², el ángulo de fricción interna es de 38° y el peso volumétrico es de 1,720 kg/m³.

Adicionalmente, durante los trabajos de exploración, se detecto un aporte de agua al sondeo a 10m de profundidad. Se considera que no corresponde con el nivel freático, ya que éste se encuentra abatido en la zona de estudio entre 21 y 25m. En la figura 3.2, se muestra el perfil estratigráfico del sondeo del sitio.

4 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN DE LA LOSA DE FONDO

Descripción general de la estructura y condiciones de carga. Derivado de las características geométricas del silo y de las longitudes de los muros construidos, se revisó una losa de cimentación a 16m de profundidad.

De acuerdo con la información estratigráfica proporcionada, la losa de cimentación se desplantaría en los limos arenosos MH, interestratificados con arenas limosas, de color café claro a gris verdoso de consistencia dura.

Análisis efectuados. De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTC, 2004), se cumplió con los estados límite de falla y de servicio.

Estado límite de falla. La revisión de la seguridad de una cimentación ante el estado límite de falla consiste en comparar para cada elemento de la cimentación, y ésta en su conjunto, la capacidad de carga del suelo con las acciones de diseño, afectando la capacidad de carga neta por un factor de resistencia y las acciones de diseño con sus respectivos factores de carga.

Cabe destacar, que en el análisis efectuado, se considera únicamente la losa circular de cimentación del silo.

Estado límite de servicio. En la Tabla 1 se muestra el resumen de las condiciones de carga a las que esta sujeta la estructura.

Tabla 1 Condiciones de carga a nivel de desplante

Condición	Peso de la estructura hasta el nivel de desplante, en t	Peso del suelo desalojado, en t	Esfuerzo que transmite la estructura a nivel de desplante, en t/m ²
Silo lleno	17,285	5,688.22	41.87
Silo vacío	6,585	5,688.22	0.74

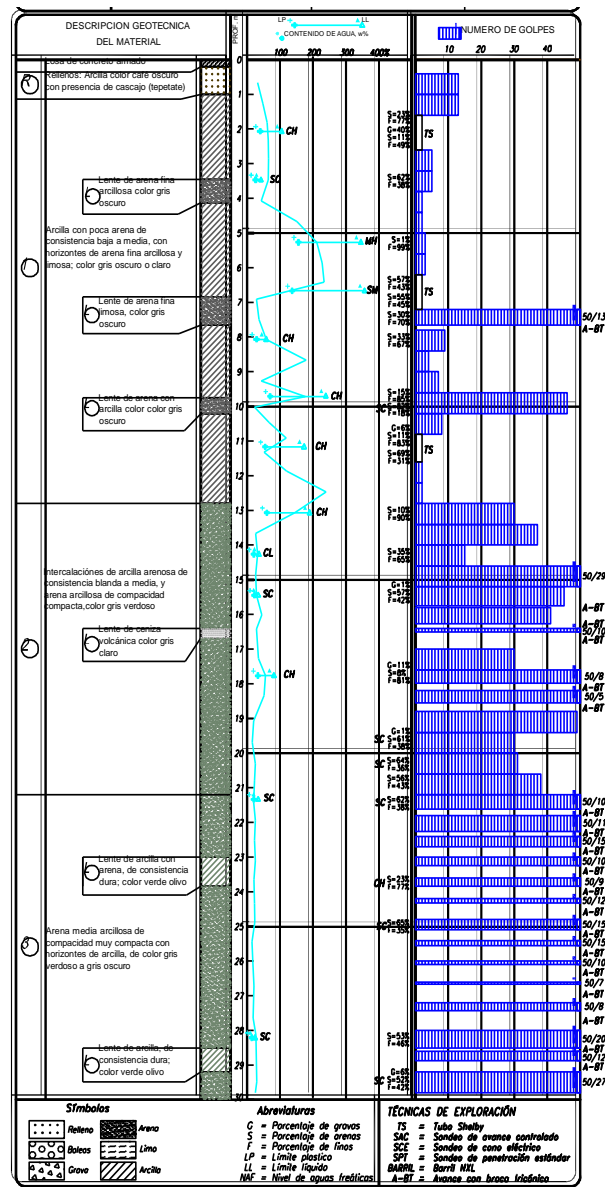


Figura 3.2, Perfil estratigráfico del sitio

Para modelar numéricamente el problema se empleó el software denominado ELPLA, el cual considera una losa infinitamente flexible para determinar los módulos de reacción.

Las deformaciones esperadas se muestran en la Fig. 5.1; la carga aplicada al modelo numérico considera el silo en operación. Se observa que la deformación máxima se presenta al centro de la losa y es de 34 cm, mientras que la periferia es de 17 cm.

En la Fig. 5.2 se muestran los módulos de reacción, utilizados para el diseño estructural de la losa fondo del silo.

5 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA EXCAVACIÓN

La excavación para alojar la cimentación del silo se realizará a cielo abierto, estabilizando las paredes mediante la construcción de muro Milán de 40cm de espesor, desplantado a 16m de profundidad.

En el diseño de las excavaciones se consideraron los estados límite de falla y de servicio, que estipula el RCDF (2004) y demás normatividades aplicables.

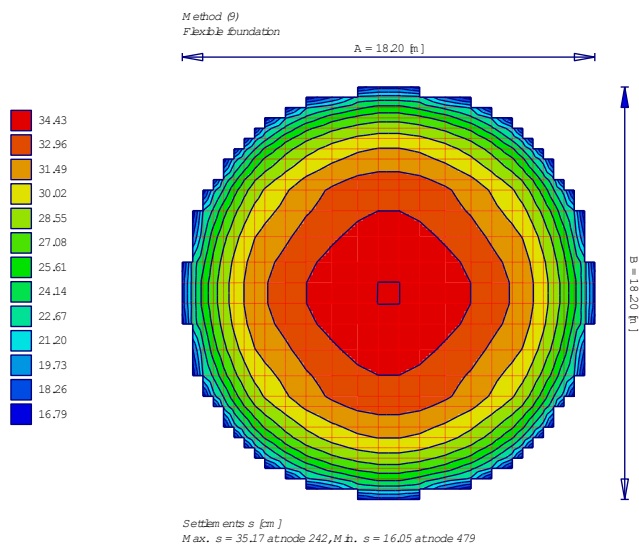


Fig. 5.1, Deformaciones verticales, en cm

Estado límite de falla. Dado que el nivel de aguas freáticas se encuentra muy abatido (21m y 25m), la falla por supresión no se presentará, ni tampoco la de flotación, por lo que se revisó únicamente la falla de fondo.

Falla de fondo. Para la revisión de la falla de fondo, se empleó el criterio que marca el Manual de Diseño Geotécnico de COVITUR (1987).

El Factor de Seguridad para la excavación del silo, de acuerdo con lo expresado en la ecuación D5-1 del Manual, se obtiene un valor de 2.20 que es mayor a lo recomendado de 1.50 (COVITUR, 1987).

En la excavación para alojar las escaleras el factor de seguridad es de 2.84 que es mayor a lo recomendado de 1.50 (COVITUR, 1987).

Estado límite de servicio. Para fines de la revisión de las expansiones que sufrirá debido a la excavación para alojar la losa de cimentación del silo, considerando las descargas mostradas en la Tabla 1 y empleando el software denominado ELPLA, se obtiene lo mostrado en la Fig. 5.3. La expansión máxima es al centro del área excavada con una magnitud de 9.00 cm, en la zona del silo.

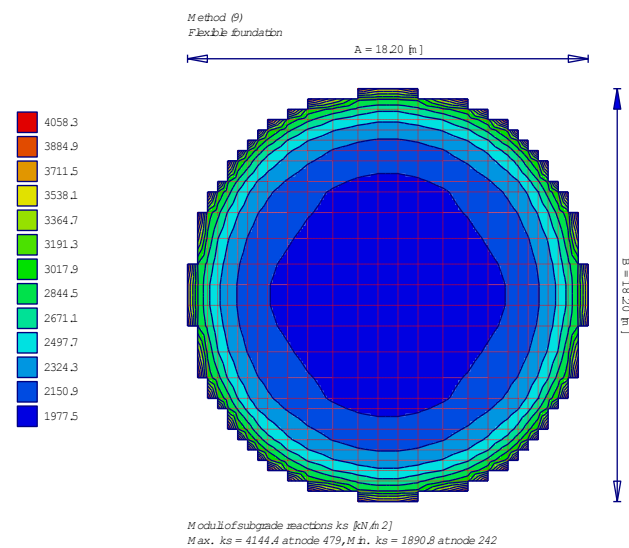


Fig. 5.2, Módulos de reacción, en kN/m3

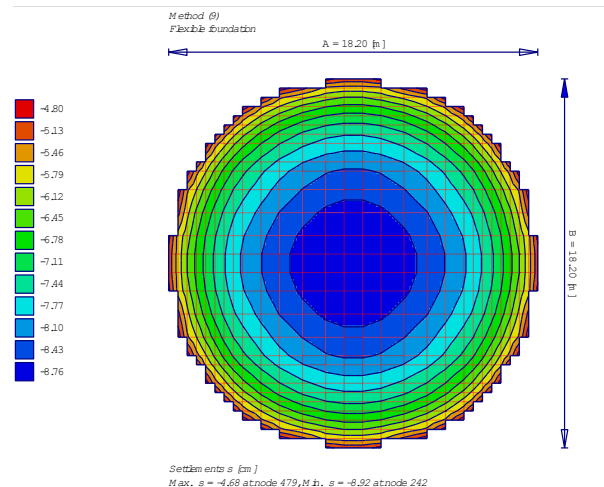


Figura 5.3 Expansiones debida a la excavación del silo, en cm

Estabilidad de la excavación. Los muros circulares tienen la particularidad de que no pueden convergir libremente cuando se les carga externamente. Considérese un muro circular delgado, con un radio R, sujeto a una

presión axisimétrica P . Un diagrama de equilibrio de fuerzas muestra que la reacción a la presión externa produce una fuerza de compresión en el muro que resiste la tendencia a convergir. En la fig 5.4 se muestra un diagrama de cuerpo libre de un segmento de muro.

No se requiere de soporte adicional para balancear las fuerzas externas (empuje del suelo), siempre y cuando éstas no excedan los límites de las propiedades de los materiales del muro (Virollet et al, 2006).

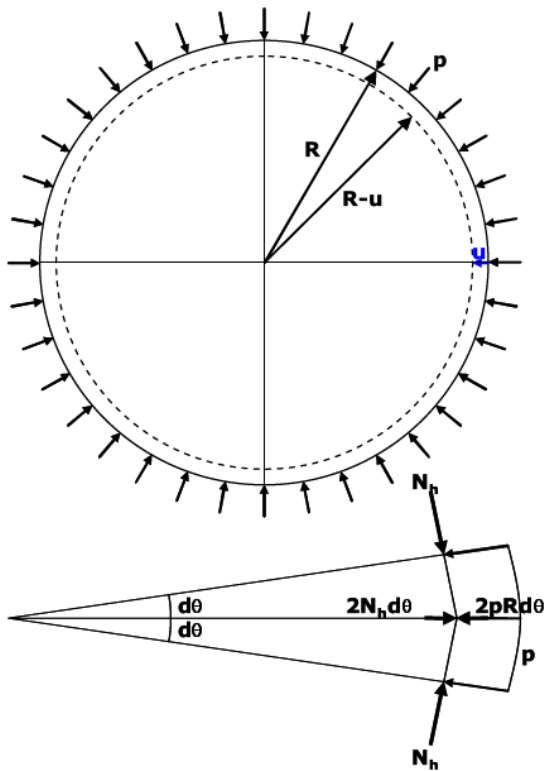


Fig 5.4, Diagrama de cuerpo libre de un segmento circular de muro

La rigidez circunferencial que relaciona la presión aplicada con el desplazamiento radial puede ser definida como:

$$P = Et\Delta R/R^2 \tag{1}$$

donde

- P presión axisimétrica
- E módulo de Young del material del muro
- R radio del muro
- t espesor del muro

Esta relación obtenida para un anillo se usa para un muro circular tridimensional bajo presiones axisimétricas.

Basado en los comentarios anteriores, puede concluirse que los muros circulares tienen ventajas comparados con los muros planos, al no necesitar anclas o apuntalamiento interior; los trabajos de excavación en el interior se llevan a cabo con mayor eficiencia.

Dado que las fuerzas radiales de compresión proveen un soporte rígido continuo al muro, el momento flexionante y la fuerza cortante en el muro se mantienen generalmente bajas, resultando en un refuerzo relativamente menor.

6 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Construcción de los muros perimetrales. Se inició con los muros-guía (brocales), para posteriormente construir los muros Milán con el sistema tradicional de paneles primarios/secundarios, utilizando tubos-junta de sección circular. El perímetro poligonal se formó con muros individuales, formados por una posición de excavación de la almeja. En la Fig 6.1 se muestra una planta de la modulación de los muros.

Como lodo estabilizador, se utilizó una mezcla de agua con polímeros. Se desplantaron a 16m de profundidad, con 40 cm de espesor y forman parte del foso del silo y de la propia cimentación. En las figuras 6.2, y 6.3, se muestran diversos aspectos de la construcción de los muros.

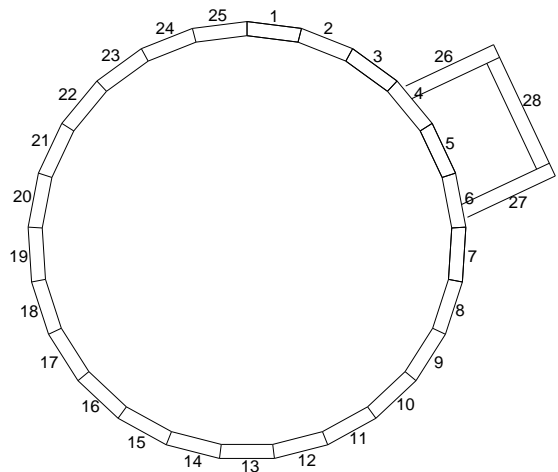


Fig. 6.1, Modulación de muro Milán



Figura 6.2 Excavación de muro Milán



Figura 6.4 Excavación de silo a nivel de losa de fondo



Figura 6.3 Izaje de armado de muro Milán

Excavación del núcleo. Una vez construidos los muros perimetrales del silo, se procedió a la excavación interna, que se realizó en una sola etapa, hasta llegar a los 16m de profundidad; la figura 6.4 muestra un aspecto de la excavación terminada.

Colado de la losa fondo. Alcanzado el nivel de desplante de la losa fondo (16m), se procedió al habilitado, cimbrado y colado de este elemento estructural, previendo dejar preparativos para la posterior fase de construcción del túnel.

Construcción de muro de acompañamiento. Adicional al muro Milán, se construyó un muro de acompañamiento. Entre ambos muros, se instaló una geomembrana, con uniones termo-fusionadas, para asegurar la impermeabilidad del interior del foso, fig 6.5.



Figura 6.5, Instalación de geomembrana

7 COMENTARIOS FINALES

Se describe el diseño de la cimentación de un silo de almacenamiento de harina de trigo. Se presentaron los resultados de los diseños de la losa de fondo y del muro Milán del silo, así como los resultados del análisis y diseño de la excavación del mismo sin apuntalamiento.

Se menciona el proceso constructivo del foso del silo, incluyendo la construcción de los muros perimetrales, y excavación del silo.

Este tipo de soluciones son atractivos también para la construcción de lumbreras, cárcamos y otras instalaciones subterráneas, al no requerir un soporte adicional interno o externo, siendo una buena alternativa a otros sistemas como lumbreras flotadas o con anillos.

REFERENCIAS

Auvinet G., Méndez, E., Juárez, M., Pérez, D. (2008) “Evolución del hundimiento regional en el valle de México”, Reunión Nacional de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Ags.

COVITUR (1987), “Manual de Diseño Geotécnico”, Vol. 1. México, D.F.

inGeum (2010), “Diseño geotécnico de la cimentación de un silo, así como su excavación”, México D.F.

NTC (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones”, Gaceta Oficial del DF, Décima Cuarta Época, 6 de Octubre de 2004, Tomo II No. 103 Bis, Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.

Virollet B., Gilbert C. and Deschamps R. (2006) “Recent Advances in Large Diameter Diaphragm Wall Shafts”, Proceedings of the 31st Annual Conference on Deep Foundations, Washington, DC, USA.