NOTA TÉCNICA

Excavaciones profundas sostenidas con anclajes activos

M.I. Rogelio MONROY SALGADO
Director Técnico-Calidad
monroy.rogelio@cimesa.net

Definición de excavación profunda

Las excavaciones profundas están presentes en importantes proyectos urbanos y de infraestructura. Permiten ganar espacio en las cada vez más congestionadas ciudades (Figura 1) y son apoyo insustituible para obras de infraestructura subterráneas, como los túneles del drenaje profundo (Figura 2). Llegar a una definición formal, sin embargo, no es asunto sencillo, ya que forzosamente deben hacerse consideraciones empíricas. En efecto, Terzaghi (1948), basándose en la experiencia práctica adquirida en la estabilización de cortes verticales apuntalados, estableció como límite arbitrario entre excavaciones profundas y someras los 6 m. Argumentando que si no se rebasaba dicha profundidad no era necesaria una investigación más profunda ni cálculos detallados del empuje del suelo, ya que el grado de estandarización alcanzado en la época permitía trabajar en condiciones seguras. Para las excavaciones más profundas, por el contrario, juzgaba necesario un estudio más detallado de la mecánica del suelo. Para las estructuras de retención a gravedad, adoptando una filosofía similar, creó un método semiempírico para el diseño de muros con altura no mayor a 7 m (Terzaghi, 1948), donde sólo es necesario encasillar el material del respaldo dentro de uno de cinco tipos de suelo para determinar un empuje activo. Considerando lo anterior, al hablar de excavaciones profundas nos estaremos refiriendo a aquellas con o sin soporte lateral que excedan las profundidades o alturas de muro antes mencionadas.

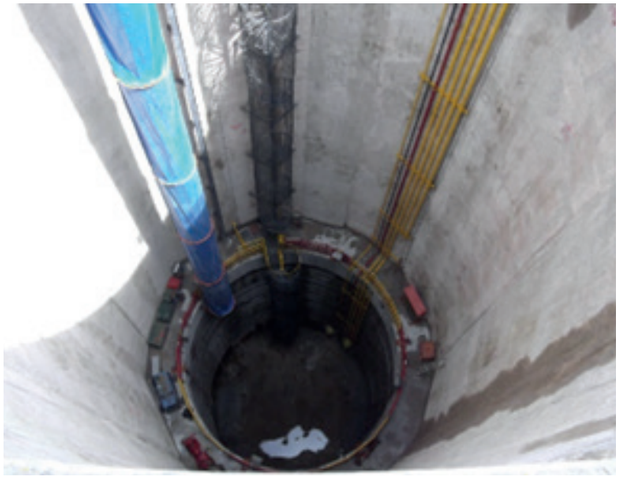
▲ Figura 1. Excavación profunda para alojar sótanos subterráneos de edificio alto (Ciudad de México).

Excavaciones a cielo abierto y con sostenimiento

Cuando existe espacio suficiente, antes de pensar en una excavación con paredes verticales y soporte lateral, debe evaluarse la posibilidad de hacerla a cielo abierto. Si es el caso, al excavar se forman taludes cuya pendiente resulta ser un factor de seguridad adecuado. Teóricamente, es posible realizar cortes verticales estables en suelos cohesivos, pero dicha "cohesión" no es un parámetro confiable y puede disminuir en el tiempo. Por ello, a este tipo de cortes no se les considera una opción viable para las excavaciones profundas. Las excavaciones a cielo abierto tienen la ventaja de que no requieren elementos de apuntalamiento al interior que obstruyan las operaciones de construcción. Estas permiten tener un alto rendimiento en el retiro de material, por lo que puede ser la solución más económica, siempre que los taludes no sean demasiado tendidos. Cuando esto último ocurre, debe analizarse si el movimiento de tierras para el retiro y relleno posterior no resulta más costoso comparado con una estructura de retención con paramento vertical. Otro aspecto igualmente importante es la necesidad de mantener la geometría de los taludes, por lo que se deben proteger contra la erosión y el intemperismo.

Las excavaciones sostenidas con una estructura de retención vertical y de sección circular son un caso interesante porque no es necesaria la mediación de elementos externos como puntales o anclajes. Además de usarse como lumbreras para túneles, también pueden emplearse para conformar sótanos de edificios altos (Figura 3). La estructura de retención puede construirse con un muro estructural de concreto lanzado (Figura 4) o un muro diafragma. En todo caso, el objetivo es el mismo, hacer que la estructura quede sujeta a empujes actuando axial y simétricamente, logrando un equilibrio estático al tiempo que los esfuerzos internos en la estructura son principalmente de compresión.

Los sistemas de retención conformados por muros verticales sostenidos con anclajes activos pueden aplicarse cuando no existen restricciones legales u obstrucciones para su perforación. Se combinan con estructuras tales como tablestacas de acero, muros de concreto lanzado, muros diafragma, pilas tangentes, etcétera. No obstante, desde la etapa de concepción debe establecerse el tiempo que la excavación permanecerá abierta, lo que define la vida útil de los anclajes y el nivel de protección contra la corrosión necesario. En las excavaciones profundas de las obras de edificación urbana, es común considerar una vida útil no mayor a dos años (tipo temporal). Se mantienen en servicio hasta el momento de



▲ Figura 2. Lumbrera circular para la construcción de drenaje profundo (Estado de México).

construir las losas de entrepiso que actúan como troqueles, momento en que los anclajes se vuelven redundantes. Los sistemas de retención anclados son relativamente flexibles, favoreciendo el empleo de estructuras más económicas. La flexibilidad e interacción suelo-estructura dan como resultado elementos mecánicos menores, comparados con los que se obtendrían de considerar la estructura como rígida y sometida a un empuje obtenido a partir de las envolventes de presión propuestas por Terzaghi (1948) o alguna versión más actualizada, como la de la FHWA (1999). Los anclajes postensados limitan de forma importante los desplazamientos de la estructura de retención, generan una fuerza de reacción que equilibra el empuje del terreno y evitan que se alcance un estado límite o de servicio, ya sea de la estructura de retención o de otra cercana o aledaña. Por este motivo, debe asegurarse su sostenimiento a lo largo de su vida de servicio mediante una prueba de aceptación individual previa a la puesta en tensión y con instrumentación ya en etapa de servicio.

Efecto de las excavaciones profundas

Las excavaciones profundas provocan cambios en el estado de esfuerzos del suelo tanto al interior como al exterior, debido al retiro de material y pérdida de confinamiento. En consecuencia, ocurren deformaciones que se manifiestan como desplazamientos de la estructura de retención, expansión y movimientos verticales en el fondo de la excavación; pero también como asentamientos y desplomes en las estructuras vecinas. También se debe tener presente el efecto del bombeo de agua subterránea, necesario para trabajar en condición "seca". Dicho bombeo tiene un efecto positivo, limitando la expansión del suelo en el fondo de la excavación por el incremento del esfuerzo efectivo; pero también puede generar consolidación y daños en estructuras vecinas, sobre todo las cimentadas superficialmente, cuando el sistema de bombeo no se diseña y opera de forma adecuada.

La geometría de la excavación da un importante indicio de las zonas donde cabe esperar los mayores desplazamientos del sistema de contención. En una excavación típica rectangular (Figura 5a) los mayores desplazamientos ocurren en la parte central del "lado largo" y pueden asimilarse como un estado de deformación plana. En el "lado corto", por otro lado, los desplazamientos son menores por el arqueo del suelo. Las esquinas sufren de un importante efecto tridimensional y los desplazamientos son mucho menores que en los dos casos anteriores. En las excavaciones con geometría irregular (Figura 5b) las esquinas también sufren del efecto tridimensional. No obstante, ahora se tienen dos casos: esquinas "positivas" y "negativas". Las primeras sufren los menores desplazamientos, mientras que en las segundas ocurre todo lo contrario.

En un proyecto de excavaciones profundas en entorno urbano debe considerarse la existencia de instalaciones y obras subterráneas en los alrededores. Las instalaciones de agua potable, electricidad, drenaje pluvial, etc., son relativamente superficiales, mientras que los túneles del sistema de transporte subterráneo o los colectores de drenaje son más bien profundos (Figura 6). Se debe evitar a toda costa que las perforaciones crucen por las obstrucciones mencionadas. Los movimientos del terreno, si resultan excesivos, pueden generar un daño en los servicios de agua potable y drenaje. Si lo anterior ocurre, el agua fugada puede infiltrarse, incrementando las acciones sobre las estructuras con un empuje hidrostático adicional.

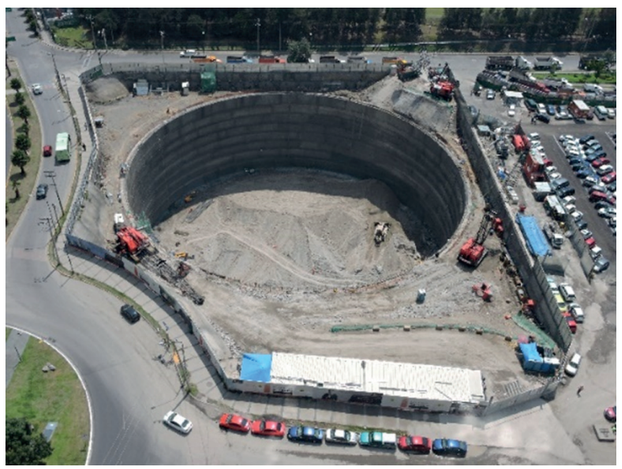
Dependiendo de aspectos tales como la rigidez del muro, el sistema de soporte y su posición, los movimientos verticales en el exterior pueden ocurrir directamente detrás del respaldo o a mayor distancia. Diversos autores, entre ellos Peck, R. (1974), han establecido relaciones entre la profundidad de la excavación y el hundimiento del suelo que pueden servir como guía para su estimación (Figura 7). La medición de este tipo de movimientos tiene como finalidad tomar medidas oportunas para evitar daños en estructuras sensibles a los hundimientos diferenciales, donde las estructuras de mampostería cimentadas superficialmente son las más vulnerables. En efecto, los umbrales para los sistemas de monitoreo en el perímetro de una excavación profunda y estructuras de interés suelen establecerse en función de la capacidad de éstas para soportar movimientos verticales diferenciales sin sufrir daño arquitectónico o estructural.

Comportamiento de la estructura de retención

El empuje del suelo provoca desplazamientos horizontales en las estructuras de retención en dirección a la excavación en función de la profundidad, el tipo de soporte lateral, las propiedades del

ANCLAS

▲ Figura 3. Excavación profunda sostenida por muro diafragma de retención circular para la construcción de sótanos de un edificio alto (Ciudad de México).

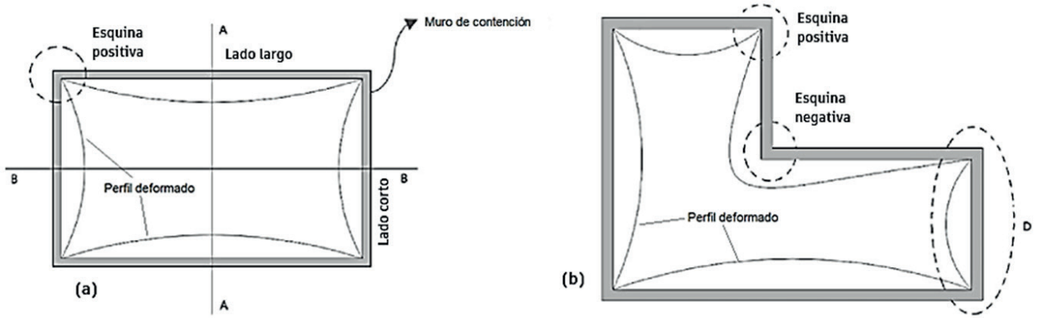


▲ Figura 4. Excavación profunda sostenida por un muro de retención circular constituido por muro de concreto lanzado reforzado (Ciudad de México).

suelo y el procedimiento constructivo (O´Rourke, 1990). Limitar este tipo de desplazamiento es de gran importancia para la propia estructura y para aquellas que se encuentran en los alrededores, debido a la relación directa entre desplazamiento horizontal y vertical al exterior de la excavación. No es raro, por lo tanto, que cuando se trata de instrumentar excavaciones profundas uno de los primeros aspectos que vienen a la mente sean los sistemas para medir desplazamientos e inclinaciones de los muros de retención.

Como ejemplo de lo que ocurre en la práctica, se muestra a continuación el caso de un muro diafragma de 600 mm de espesor, construido en la zona de transición (Zona II) del Valle de México (Figura 8). El sostenimiento está dado por dos niveles de anclajes activos de tipo temporal con inclinación de 45 grados. El primer nivel (N1) consta de anclajes de seis cables de torones de 15 mm de diámetro (tipo 6T15) con una carga de bloqueo de 900 kN y el segundo (N2) por anclajes tipo 9T15 con carga de bloqueo de 1200 kN. El muro tiene una profundidad de 20 m y el nivel máximo de excavación está a 15.7 m. La Figura 9 muestra las configuraciones deformadas del muro para cinco momentos representativos de cada etapa constructiva (numeradas del 1 al 5). Los desplazamientos se comparan con un desplazamiento teórico previamente calculado. En este caso, se hicieron dos hipótesis con base en la ubicación del nivel de aguas freáticas (NAF) que corresponden a las dos líneas continuas gruesas. Si el NAF se encuentra a 7 m el empuje es menor y se considera como la condición teórica favorable. Pero, si el NAF estuviera a 3 m, se tendría mayor empuje y por lo tanto una condición más desfavorable. La Línea 1 corresponde a la excavación para construir las anclas N1 y muestra un comportamiento en cantiléver cuyo

▼ Figura 5. Geometría de excavación y perfil deformado en planta (Ou, 2022).

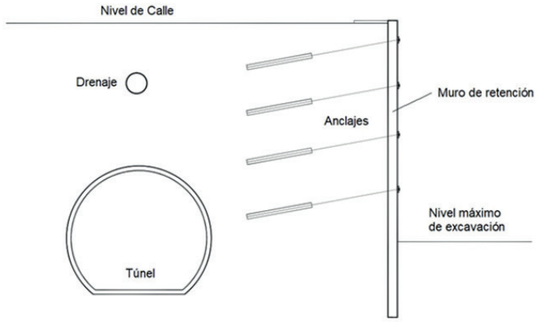


desplazamiento en cabeza es de 7 mm. La Línea 2 muestra la retracción del muro por la puesta en tensión de los anclajes N1. El movimiento previo en cabeza se recupera, pero queda un pequeño desplazamiento de 4 mm a 11 m de profundidad. La Línea 3 corresponde al desplazamiento por la excavación realizada para construir los anclajes N2. Nuevamente hay un desplazamiento en dirección a la excavación, donde el máximo es 17 mm a los 11 m. La puesta en tensión de los anclajes N2 hace que la deformación se recupere en cierta medida, y la deformación máxima ahora es de 13 mm a 11 m. Por último, la Línea 5 representa el desplazamiento máximo cuando se alcanza el nivel máximo de excavación (15.7 m). La deformación máxima ahora es de 24 mm a 12 m. Como puede verse, en la condición final se excede la deformación máxima de 17 mm para la condición teórica favorable, sin embargo, queda lejos de la deformación máxima para la condición teórica desfavorable (57 mm).

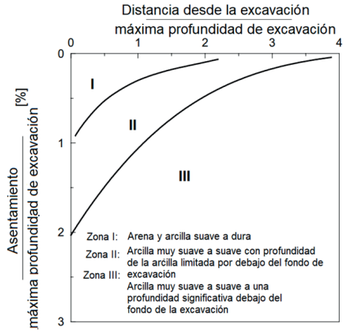
Medición de la carga en anclajes activos

La carga o estado de tensión en los anclajes activos a lo largo de su vida de servicio puede medirse con celdas de carga que se colocan en cabeza (Figura 10). La medición puede ser manual o automatizada para tener datos continuos. Existen en el mercado celdas de diversos tipos, las más populares son las de cuerda vibrante, las de resistencia eléctrica y las hidráulicas. Se consiguen con rangos que van de 100 a 10,000 kN, pero mediante construcción especial pueden llegar a 15,000 kN. La precisión suele ser de ± 0.5% y la resolución 0.025% de la escala total en ambos casos. También suelen tener un sobre rango de 150%, lo que protege contra daño a los deformímetros (“*gauges*”) al interior. La tensión en el anclaje, no obstante, puede variar a lo largo de la vida útil. De forma conceptual, el comportamiento que puede esperarse es el que se muestra en la Figura 11 (TA2020, 2020). La línea amarilla representa la fase de construcción, donde la tensión es cero. La línea azul es el incremento de carga durante la prueba de aceptación hasta alcanzar la carga de prueba (Te) y la línea verde la etapa de deformación a carga constante (fluencia). La línea roja punteada es la disminución de carga desde Te hasta la carga inicial de bloqueo (Tb) en primer lugar y la residual o bloqueada (Tr) posteriormente. Ya en servicio, el anclaje puede sufrir incrementos de tensión conforme se avanza la excavación (línea morada) hasta llegar al máximo, representado por la carga de servicio (Ts). A partir de este momento

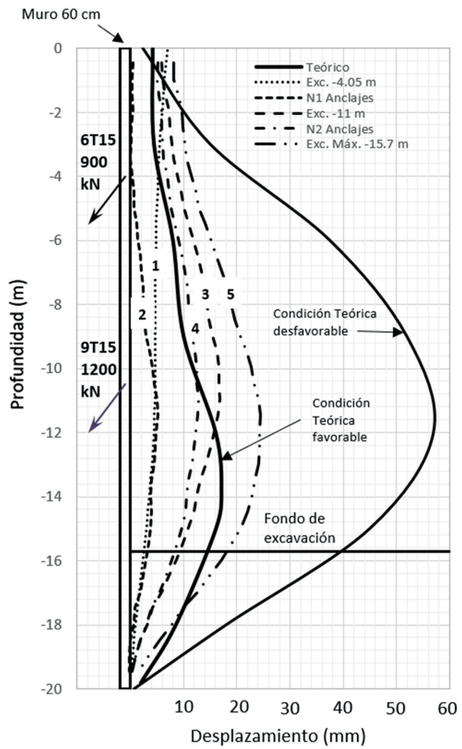
► Figura 8. Excavación profunda sostenida por muro diafragma y anclajes activos (Ciudad de México).



▲ Figura 6. Instalaciones urbanas y obras subterráneas adyacentes a una excavación profunda.



▲ Figura 7. Relación entre desplazamiento horizontal y vertical según tipo de terreno (Peck, 1974).



▲ Figura 9. Comportamiento de muro diafragma sostenido por dos niveles de anclajes activos.

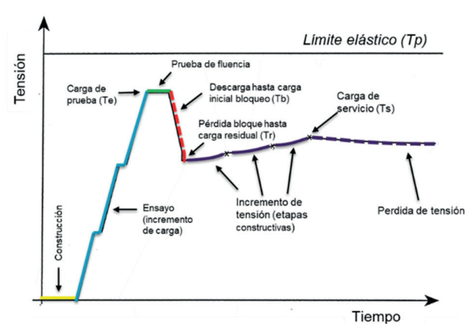
▲ Figura 10. Celda de carga de cuerda vibrante colocada en la cabeza del anclaje.

entra en juego el fenómeno de relajación del acero y puede presentarse una ligera reducción de la tensión en el tiempo (línea morada punteada), pero que no tiene relación alguna con la capacidad geotécnica del anclaje.

Instrumentación geotécnica y método observacional

La instrumentación geotécnica no consiste solo en el empleo de instrumentos de medición, sino que es un proceso integral de ingeniería que comienza con la definición de un objetivo claro (CFE, 1983). A partir de lo anterior, se definen los datos de interés, los instrumentos adecuados, la frecuencia de adquisición, el método de tratamiento y análisis, y la retroalimentación al diseñador. Los datos obtenidos se comparan con valores calculados de forma teórica a fin de tomar decisiones. Una instrumentación geotécnica implementada de forma correcta permite mitigar el riesgo efectivamente. En lo que concierne a las excavaciones profundas, la implementación de acciones debería surgir de una alerta temprana del sistema de instrumentación, una vez que se alcance el umbral previamente definido.

El empleo de instrumentación geotécnica para observar lo que ocurre en campo durante la ejecución está íntimamente ligado a lo que en la especialidad geotécnica se denomina "Método observacional". Este método tiene un significado restringido y específico, y su formulación y desarrollo como procedimiento sistemático se debe a Karl Terzaghi (Peck, 1969). Terzaghi consideró que los resultados de los cálculos no son más que hipótesis de trabajo que deben confirmarse o modificarse durante la construcción y que en consecuencia pueden conducir a una modificación del diseño original conforme los trabajos se ejecutan. Peck (1969) advierte también que el uso efectivo de este método exige contar con un plan de acción bien definido para toda posible situación desfavorable que se descubra por medio de la observación y esta debe, además, ser confiable. El desarrollo tecnológico actual en instrumentos, equipos de interfase, software y plataformas de envío y almacenamiento de datos nos permiten observar en tiempo real lo que ocurre, permitiendo un monitoreo eficaz a distancia por el responsable de la instrumentación, el ingeniero de diseño,



▲ Figura 11. Estado de tensión de un anclaje activo a lo largo de su vida útil (TA2020, 2020).

la supervisión de obra, la figura legal responsable e incluso el propietario. Las plataformas de interfaz también permiten asignar alarmas de monitoreo o umbrales para los diferentes rangos de medición y con ello avisar con oportunidad algún comportamiento que exceda los límites contemplados, incrementando así la seguridad de las obras en general y las excavaciones profundas en particular.

Conclusiones

Cuando se habla de excavaciones profundas con o sin soporte lateral, nos referimos en general a aquellas que exceden profundidades o alturas de muro de retención de entre 6 y 7 m.

Los sistemas de retención con muros verticales sostenidos por anclajes son posibles cuando no existen restricciones legales u obstrucciones para la perforación.

La tensión en los anclajes evita que se alcance un estado límite o de servicio tanto en la estructura de retención como en las estructuras cercanas. El sostenimiento de dichas estructuras debe garantizarse a lo largo de su vida de servicio mediante una prueba de aceptación en la etapa de construcción y monitoreo instrumentado en la etapa de servicio.

Las excavaciones profundas provocan cambios en el estado de los esfuerzos del suelo que se manifiestan como desplazamientos de la estructura de retención, expansión y movimientos verticales en el fondo de la excavación, asentamientos y desplomes en las estructuras vecinas.

El empleo de instrumentación geotécnica para observar lo que ocurre en campo durante la ejecución está íntimamente ligado al "Método observacional".

Los umbrales para los sistemas de monitoreo para una excavación profunda y las estructuras de interés suelen establecerse en función de la capacidad de éstas últimas para soportar deformaciones sin sufrir daño arquitectónico o estructural.

Las plataformas de interfaz también permiten asignar alarmas de umbral, para saber con oportunidad de algún comportamiento que exceda los límites contemplados, lo que incrementa la seguridad de las obras en general y las excavaciones profundas en particular.

Referencias

CFE (1983) Manual de diseño de obras civiles. Geotecnia. Mecánica de suelos. Instrumentación. Comisión Federal de Electricidad. México.

FHWA (1999) Ground Anchors and anchored systems. Geotechnical circular No.4. Publication FHWA-IF-99-015. US Department of Transportation. Federal Highway Administration.

Ou, Chang-Yu (2022) Fundamentals of deep excavations. Taylor & Francis Group. London, UK.

Peck, R. (1969) Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics Géotechnique 19 No. 2, 171-187-. Ninth Rankine Lecture.

Peck, R. (1974). Foundation Engineering 2nd. Ed. Jonh Wiley & Sons. New York.

TA2020 (2020) Tirants d´ancrage. Règles Professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l´exécution, au contrôle et à la surveillance. Comité Français de mécanique de sols et de géotechnique.

Terzaghi, K. (1948) Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.