Sistemas de contención para excavaciones profundas Procedimientos constructivos

Saraid Santamaria[(1)], Walter I. Paniagua[(2)]
[(1)] Pilotec, Ciudad de México, México <saraidsantamaria@gmail.com>
[(2)] Pilotec, Ciudad de México, México <wpaniagua@pilotec.com.mx>

RESUMEN. Se destaca la importancia de los métodos de contención para las paredes de excavaciones en grandes Ciudades donde se construyen edificios cada vez más altos que requieren cimentaciones cada vez más profundas.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la evolución de los conocimientos y la tecnología se ha reflejado en las construcciones alrededor del mundo, en las grandes ciudades el número de edificios altos para diversos usos ha ido en aumento, obligando a la ingeniería geotécnica a realizar cimentaciones cada vez más profundas, para lo cual es necesario tener en cuenta un método adecuado para la contención de las paredes de grandes excavaciones, combinado con un sistema de apuntalamiento que se adapte a las necesidades del proyecto.

La correcta elección de dichos sistemas, depende de las condiciones de cada proyecto, es por esto que cuan mayor y más precisa sea la información geotécnica disponible, mayor será el éxito del proceso constructivo de la excavación.

En la actualidad las pilas son el método de contención de excavaciones más utilizado, seguido de los muros milán cuyo uso se ha incrementado en los últimos años. En la Figura 1 se muestran los sistemas de contención más utilizados en el mundo. En este artículo se presentan las características de algunos de estos y otros sistemas de contención y apuntalamiento, se indican los procedimientos constructivos y un análisis de las cualidades de cada uno de ellos.

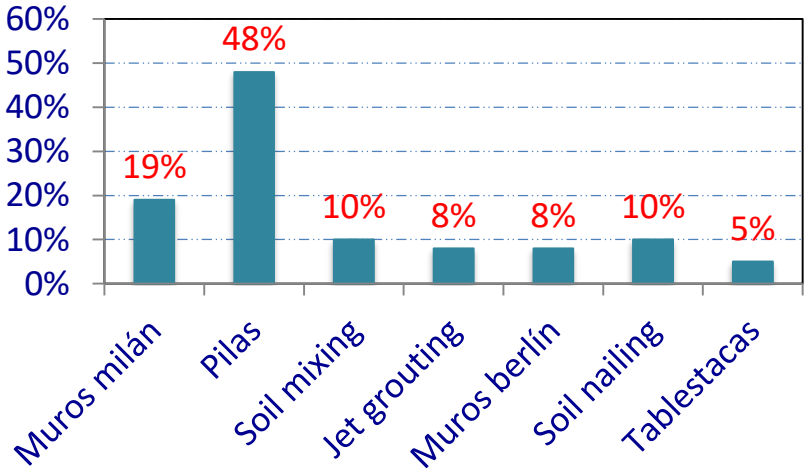


Fig. 1. Contención de excavaciones en el mundo, Modificado de Bottiau, M. (2006).

2. SISTEMAS DE CONTENCIÓN

2.1 Muros pantalla (milán) colados en sitio

La técnica de los muros milán surgió en Italia por el año 1938.En Estados Unidos, se construyó el primer muro milán en 1962, posteriormente se usó en la construcción del metro de San Francisco y para el World Trade Center de Nueva York. En la Ciudad de México se adoptó la técnica del muro milán en 1967.
Los muros milán, también conocidos como muros diafragma o pantalla, son estructuras de concreto reforzado que sirven como elemento de sujeción temporal de zanjas longitudinalmente abiertas en la masa de suelo. Algunos elementos del procedimiento constructivo son:

Brocales. Además de verificar la posición topográfica de los muros, controlan que la almeja entre en la posición correcta y estabilizan la parte superior de la excavación. Generalmente son de concreto reforzado con una malla electrosoldada (Fig. 2.)

Excavación. Se desarrolla una primera etapa de excavación que se detendrá cuando los muros iniciales tengan la edad mínima; en ese momento el equipo de excavación y colado retrocede para iniciar la segunda etapa de avance, en la que se construyen los tableros intermedios faltantes.
El equipo de excavación es otro factor importante, entre los más destacados se encuentran:

- Almejas mecánicas de caída libre (Fig. 3)
- Almejas hidráulicas de caída libre
- Perforadoras de circulación inversa
- Almejas hidráulicas guiadas con Kelly:
    - Kelly entero
    - Kelly telescópico
    - Kelly cortos con almejas autodireccionables
- Hidrofresa

Fig. 2. Construcción de brocales de concreto

Fig. 3. Almejas mecánicas de caída libre

Algunas de las características más importantes de los lodos que influyen en el comportamiento para estabilizar excavaciones son:

- Densidad: Expresa el peso por unidad de volumen de los lodos.
- Viscosidad: Es una medida de la resistencia interna de la mezcla.
- Contenido de arena: Es deseable una cantidad menor de 10%.
- Potencial hidrógeno (pH)

Lodos Bentoníticos: Se obtienen mezclando bentonita con agua. Estos lodos, introducidos durante la excavación de la zanja, forman en sus paredes una costra o “cake” y una especie de membrana de muy baja permeabilidad que permite la aplicación de la presión del fluido estabilizador a las paredes de la excavación y. Es indispensable en suelos no cohesivos como arenas permeables donde se requiere la mayor viscosidad posible.

Lodos de polímeros: Sirven como fluidos estabilizadores de la excavación con algunas ventajas sobre los lodos con bentonita; los polímeros orgánicos de policrilamida forman moléculas grandes en cadena constituidas por un mismo grupo de partículas o moléculas del mismo material; al mezclarse con agua obtiene rápidamente cualidades estabilizadoras por su habilidad aniónica.
El procedimiento para la elaboración de lodos se muestra en la Fig. 4 y consiste en los siguientes pasos:

- Mezclado e hidratado
- Proceso de batido
- Transporte y colocación
- Recuperación y regeneración
- Eliminación del lodo

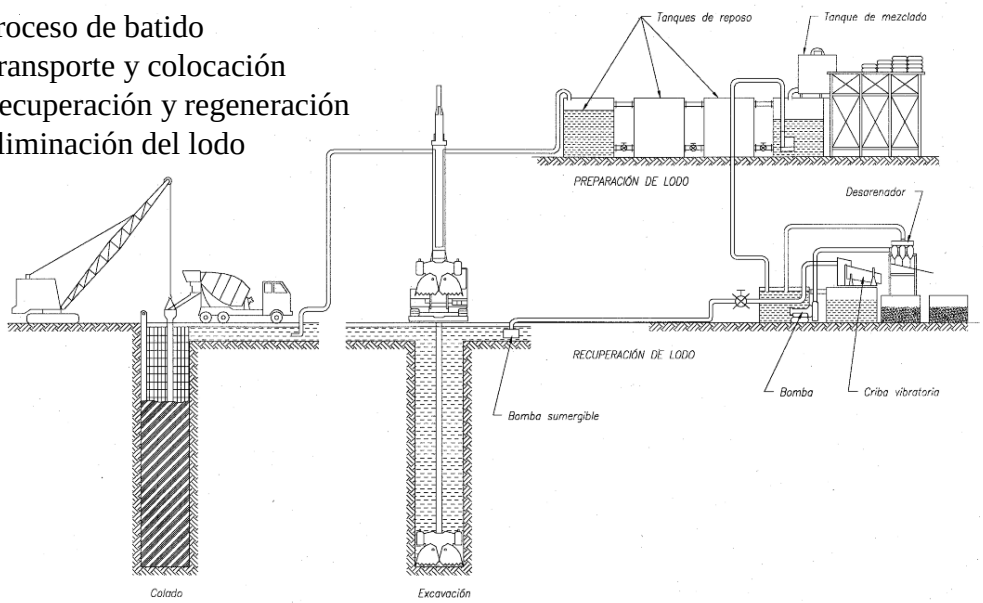


Fig. 4. Instalación esquemática de la operación de lodos

Restricciones de frontera. Las juntas de acero permiten confinar temporalmente uno o los dos extremos verticales de uno de sus módulos durante el proceso del vaciado del concreto con la finalidad de conformar su superficie para producir un machihembrado que permita la unión estructural por cortante con el siguiente módulo. La geometría de las juntas debe estar en congruencia con la forma de la almeja con la que se realice la excavación de la zanja.

Acero de refuerzo. Para formar los armados de los muros se necesita ensamblar varillas de refuerzo en parrillas o jaulas, unidas con silletas y pasadores diagonales. Es importante que el espaciamiento entre varillas debe permita el libre flujo del concreto entre estas y las paredes de la zanja para que el colado de los muros con tubo tremie sea uniforme y sin obstrucciones Fig. 5.

Colocación de concreto con tubo Tremie. El uso de tubo tremie es fundamental para el colado de un tablero desde el fondo de la excavación, evitando la contaminación del concreto.

El concreto debe ser premezclado para el mejor control de calidad, con la suficiente fluidez para acomodarse más rápidamente y el tubo tremie nunca deberá trasladarse a través del concreto fresco, también se utiliza un tapón separador para evitar que el concreto se contamine con el lodo; cuando el concreto entra a la tubería; el tapón desciende por el peso de la masa fresca y llega al fondo. En este estado el tubo tremie es levantado levemente permitiendo que el concreto empuje al tapón hacia fuera; una vez que esto ocurre el concreto empieza a descargarse y rellenar el panel mientras la tubería permanece sumergida como se muestra en la Fig. 6.

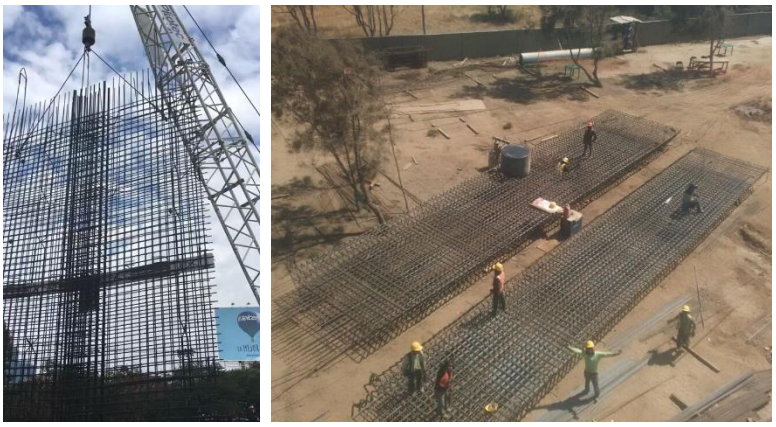


Fig. 5. Izaje y armados de acero de refuerzo

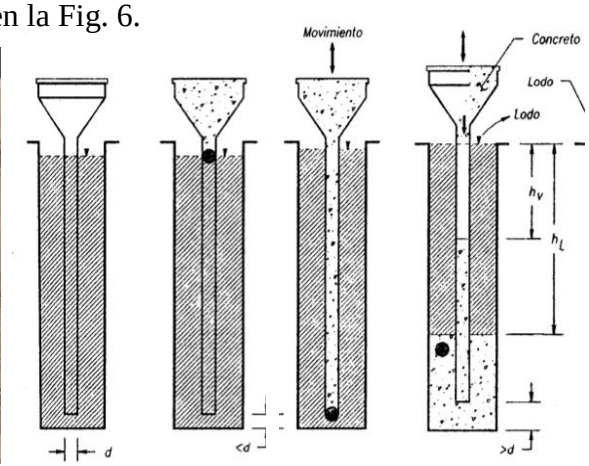


Fig. 6. Colado con tubo tremie

2.2 Muros pantalla prefabricados

Los muros prefabricados son una secuencia de piezas precoladas verticales de concreto que se ensamblan mediante un gancho y placas guía de acero.

El procedimiento de construcción para estos muros es muy similar al de los muros colados en sitio, sin embargo, las piezas se pueden fabricar en planta o en obra con anchos entre 0.20 y 1.20 mm, requieren un menor apuntalamiento y obtienen un acabado definitivo; tales características, se pueden considerar como ventajas de este procedimiento sobre el de los colados en sitio, mayormente si consideramos los tiempos de ejecución. El procedimiento general queda resumido en los siguientes puntos:

- Fabricación de muro
- Construcción de brocales
- Excavación de zanja con almeja guiada
- Colocación de muro precolado
- Lodo fraguante

La zanja para estos muros se estabiliza de igual forma con lodo bentonítico, pero previamente a la colocación de los precolados de concreto, se sustituye con una mezcla de cemento, bentonita y agua (lodo fraguante), que una vez colocadas todas las piezas, endurece hasta alcanzar una resistencia similar a la del subsuelo para soportar y confinar el muro en su posición.

La secuencia para la colocación de los muros puede ser con avance modular utilizando la técnica desarrollada por la empresa francesa *Bachy* o con la técnica desarrollada posterioremente en el mismo país por la empresa *Soletanche* en 1970 con el nombre de *Panasol* que permite lograr un procedimiento con avance continuo, esta última técnica permite avances largos de excavación y un aprovechamiento máximo del equipo de construcción.

En las Fig. 7-9 se muestran algunos ejemplos de muros precolados.

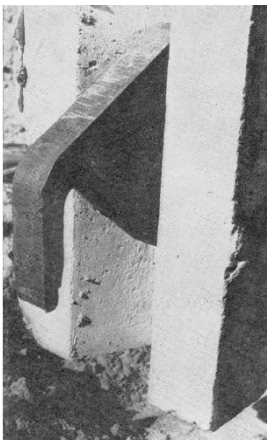


Fig. 7. Conexión de de gancho en la base

Fig. 8. Izaje de muro precolado

Fig. 9. Muros precolados en metro de la Ciudad de México

2.3 Tablestacas de concreto

El uso de las tablestacas de concreto reforzado se conoce desde 1914, son de sección cuadrada o rectangular, muy similares a las tablestacas de madera y se hincan una seguida de la anterior para formar un muro continuo. Se puede resumir el procedimiento constructivo de este método en tres pasos:

1.- Excavación de una zanja de 1.20 m de ancho x 1.40 m de profundidad para alojar brocales de vigas metálicas y madera o en algunos casos de concreto.

2.- Una pieza casi cuadrada sin bisel en la punta se coloca en la esquina, preferentemente hincada en una perforación previa con extracción parcial de material.

3.- Hincado de las piezas subsecuentes cuidando que la pieza de unión conocida como “macho” de la tablestaca por hincar, remueva el suelo de la “hembra” que se encuentra en la tablestaca ya colocada.

Geometría. Generalmente la sección de una tablestaca de concreto reforzado varía entre 20 y 40 cm de espesor, anchos entre 40 y 70 cm y hasta 16 m de longitud. Las puntas suelen construirse biseladas entre 30° y 45° con el fin de que durante el hincado tiendan a acercarse a la tablestaca que se colocó anteriormente.

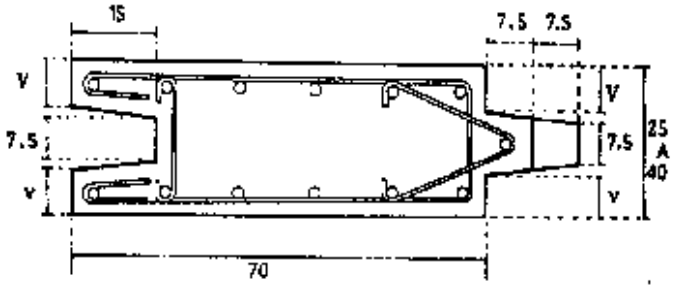


Fig. 10. Sección típica de una tablestaca de concreto

Fig. 11. Hincado de tablestaca

La fabricación de las piezas se realiza utilizando camas de colado y almacenando las piezas para su posterior hincado, es conveniente el uso de cimbras metálicas y curado a vapor.

Equipo para hincado. Las piezas se pueden hincar principalmente a través de martillos de caída libre y diésel de acción sencilla, cuidando la protección en la cabeza de la tablestaca con el uso de casquetes.

Dificultades durante el hincado. Las tablestacas pueden desviarse de la verticalidad durante el hincado si encuentran algún obstáculo o puede que la porción inferior de un tablestacado siga una línea ondulada. Dado que estas dificultades pueden ocurrir es necesario fabricar piezas especiales que pueden ser fabricadas con cualquier combinación de machihembrado.

2.4 Tablestacas de acero

Estos paneles conectados por perfiles estructurales laminados en caliente o rolados en frío, destacan por su peso ligero, su mayor resistencia y durabilidad, es por esto que son las tablestacas más usadas mundialmente.

La elección de la geometría de los perfiles dependerá de la aplicación constructiva y las exigencias estructurales a las que estarán sometidas, además de las condiciones del proyecto. En la Figura 12 se muestra un comparativo de los diferentes perfiles con base en su uso y aplicación.

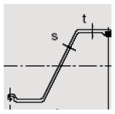
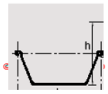
Perfil	Sección	Aplicación	Uso	Ventajas	Desventajas
Z		Excavaciones Muelles Apoyos de puentes	Cuando los momentos flexionantes gobiernen el diseño	Sección Simétrica sobre su eje neutro. Mayor momento de inercia	- -
U				- -	Momento de inercia bajo debido a que el eje neutro coincide en la unión.
Plano		Estructuras celulares circulares Estructuras cerradas	Cuando la resistencia a la tensión de la conexión gobierne el diseño	- -	Momento de inercia nulo

Fig. 12. Secciones típicas de tablestacas de acero

Fig. 13. Tablestacas Z

El equipo de hincado depende del tipo de suelo y perfil seleccionado, generalmente se usan martillos vibratorios que transmiten vibraciones a la tablestaca, reduciendo la ficción entre tablestaca y suelo que se genera al momento del hincado.

2.5 Pilas secantes

Las pilas coladas en sitio se pueden utilizar como método de contención formando una barrera; principalmente en accesos restringidos o sitios donde se prefiere no hacer ruido ni generar las vibraciones para hincar tablestacas.

Pilas separadas

Se refiere a pilas separadas entre 0.8 y 0.9 veces su diámetro a las cuales se les identifica como pilas primarias, posteriormente se construyen pilas secundarias que las intersectan para poder cerrar la estructura y con esto detener el flujo de agua y prevenir la migración de suelo entre los elementos. Cuando las pilas secundarias se encuentran adyacentes a las primarias se les conoce como pilas tangentes.

Como variantes al procedimiento se puede construir pilas secundarias con diámetros más pequeños que se encuentren fuera del eje de las primarias o construir pilas primarias separadas entre uno y dos diámetros en suelos que puedan desarrollar arqueo entre las pilas.

El procedimiento de construcción para este método se clasifica de acuerdo a la manera en que se construyen las pilas primarias:

Técnica duro/duro: Las pilas primarias y secundarias se construyen con concreto reforzado o mortero de alta resistencia, utilizando perforadoras de hélice continua.

Técnica suave/duro: Las pilas primarias se construyen con una mezcla de cemento-bentonita para perforar las pilas secundarias con mayor facilidad, utilizando equipos de menor par de torsión. Ésta técnica se limita a excavaciones someras o con momentos flexionantes relativamente bajos.

Perforación. Se usa un brocal de concreto para la ubicación de pilas tanto primarias como secundarias. Las pilas se perforan a cada quinta posición con una perforadora rotatoria o una perforadora de hélice continua.

La colocación del acero de refuerzo y el concreto dependerán del tipo de perforadora utilizada.

Fig. 14. Brocal para pilas secantes

Fig. 15. Pilas tangentes

Fig. 16. Pilas separadas

2.6 Concreto Lanzado

El concreto lanzado se puede definir como un concreto transportado por algún medio, vía húmeda o vía seca, a través de una manguera y lanzado neumáticamente a una gran velocidad contra una superficie (Definición ACI 506 R).

Para el caso de la contención en las paredes y taludes de excavaciones, el concreto lanzado protege el terreno contra la filtración de agua de lluvia y la erosión por el viento y los cambios de temperatura. La protección y estabilización de taludes y excavaciones es una de las aplicaciones del concreto lanzado de mayor importancia, ya que generalmente está formado por materiales heterogéneos y continuos.

Fig. 17. Lanzado de concreto

2.7 Soil mixing

Consiste en mezclar mecánicamente el suelo con un agente cementante inyectado en forma de lechada para obtener columnas circulares o paneles rectangulares con alta resistencia al corte, baja compresibilidad y permeabilidad muy baja. La técnica también es conicida como “Deep Mixing”.

A pesar de ser un método utilizado desde los años 70´s en Japón, originalmente y durante varias décadas el método Soil mixing fue utilizado únicamente para el mejoramiento de suelos, desde principios del Siglo XXI se ha incrementado considerablemente su uso para formar muros de retención de tierra y/o agua en excavaciones. Esta nueva aplicación se basa en los más recientes avances en el equipo utilizado en el método Soil mixing.

Para realizar la mezcla y formar las columnas se utilizan herramientas diseñadas especialmente para eso, en las Figuras 18-20, se muestra la tecnología más reciente en equipo para Soil mixing:

- CVR C-mix®
- Tubular Soil Mix (TSM)
- Cutter Soil Mix (CSM)

Fig. 18. Sistema CVR (CVR C-mix)

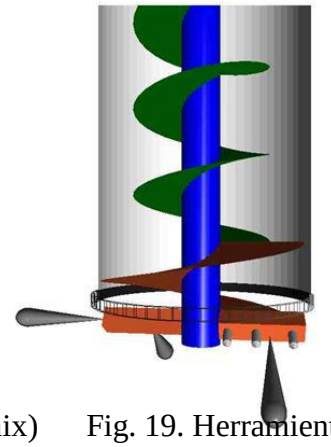


Fig. 19. Herramienta TSM (Smet-F&C)

Fig. 20. CSM (Bauer)

Las columnas o paneles son colocados uno tras otro en una secuencia similar al de las pilas secantes hasta formar un muro que es apuntalado con troqueles o anclas. Durante la ejecución se pueden instalar vigas de acero en la mezcla fresca con el fin de resistir las fuerzas cortantes y momentos de flexión que la presión del agua en la tierra pueda generar al muro de contención.

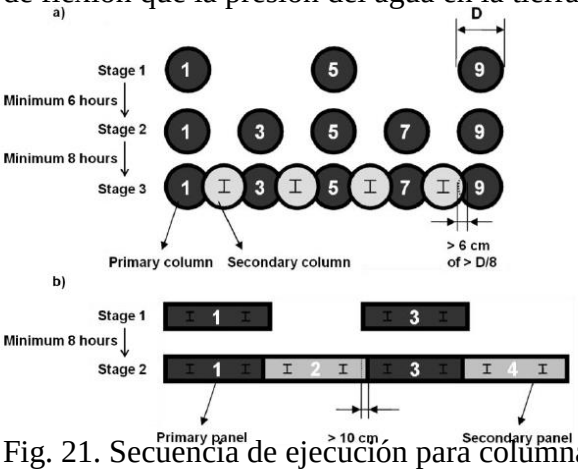


Fig. 21. Secuencia de ejecución para columnas y paneles

Fig. 22. Muro Soil mixing con técnica CSM (Lameire Funderingstechnieken n. v.)

3. SISTEMAS DE APUNTALAMIENTO

3.1 Anclas

Los sistemas de anclaje proporcionan fuerzas externas para lograr la estabilidad de taludes o excavaciones a cielo abierto o en túneles o galerías subterráneas. Se pueden utilizar solas o como complemento de otras estructuras tales como muros de contención, tablestacas, muros milán, étc. Un ancla de tensión consta de tres partes principales: (1) la longitud fija (Bulbo de inyección)- que brinda la fuerza de anclaje, (2) la longitud libre-que transfiere la fuerza de anclaje a la cabeza del ancla, (3) la cabeza del ancla- que es donde se desarrolla la longitud de tensado y se transfiere la fuerza de anclaje a la estructura.

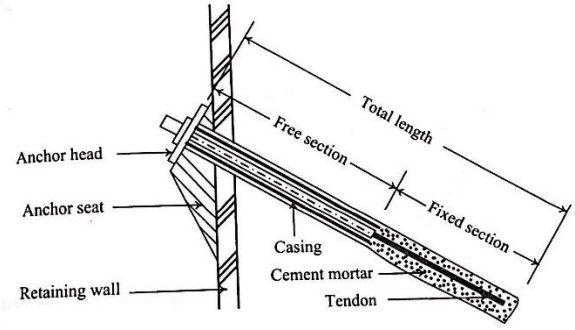


Fig. 23. Configuración básica de un ancla

Fig. 24. Anclas habilitadas

Procedimiento constructivo.

1.- Trabajos preliminares. Consiste en la ubicación de puntos y bancos de nivel para el control topográfico, los cortes previos en taludes o excavaciones y la instalación de drenes.

2.- Habilitación de anclas. La secuencia para el habilitado dependerá del tipo de ancla; incluye las cabezas de bala que permiten la instalación del cuerpo del ancla en cualquier tipo de suelo, la habilitación, limpieza y fijación de conjuntos de cables de acero llamados torones, la colocación de separadores, mangueras de inyección primarias, obturadores, mangueras de inyección secundarias, engrasado de torones en la longitud libre y de una funda de protección constituida por tubo de pvc.

3.- Perforación. El tipo de perforadora dependerá del tipo de materiales y condiciones del sitio; incluye:

- **Instalación de anclas:** El ancla habilitada se transporta y se inserta manualmente dentro del barreno.
- **Inyección del bulbo**: Se introduce el mortero controlando la inyección con un manómetro en la boca del barreno.
- **Habilitación del cabezal de ancla:** Incluye el colado de la zapata de apoyo, colado o instalación de viga madrina, colocación de placa de apoyo, cuñas de alineamiento, “queso” de torones y cuñas de sujeción.
- **Tensado inicial:** Se realiza mediante un gato hidráulico que sujeta los extremos de los cables y, apoyado sobre el cabezal, permite aplicar controladamente la fuera de tensión.
- **Inyección secundaria:** Protege la longitud libre, ocupando el espacio entre la funda lisa y las paredes del barreno. Se cuela por gravedad después del tensado.

Fig. 25. Transporte de ancla

Fig. 26. Tensado y apoyo de un ancla

Fig. 27. Muro milán con anclas postensadas

3.2 Puntales

Los puntales son fabricados a base de tubería de acero de características determinadas, pudiendo también ser de celosía, según lo que indique el proyecto. Su objetivo es ayudar a soportar el empuje del terreno provocado por la descompensación del mismo, al efectuar el desalojo del material en esa zona.

Los troqueles fabricados de tubería cuentan con diámetros entre 16” y 20” y los de celosía generalmente son de sección cuadrada; su longitud es muy variable, dependiendo del tamaño de la excavación; en cada extremo cuentan con cabezales cuya función es absorber los empujes de los gatos hidráulicos para la presión del troquel en las paredes de la excavación. Estos cabezales tienen una placa de acero para apoyarse directamente en elementos de madera formados por troncos de árbol cortados transversalmente, con espesores que varían entre 10 y 20 cm y diámetros entre 40 y 60 cm llamados “quesos” o tacones y tienen la función de absorber la presión del troquel y transmitirla directamente al muro de retención.

Se usan gatos hidráulicos, en un extremo de cada troquel para aplicar la precarga necesaria según el diseño y materiales adicionales para la correcta fijación de los troqueles como cuñas de acero, estrobos de una pulgada, perros de sujeción y cable manila o de plástico.

Para la colocación de los puntales de acero se utilizará una grúa hidráulica o la draga con la que se está excavando, o bien, la combinación de ambas.

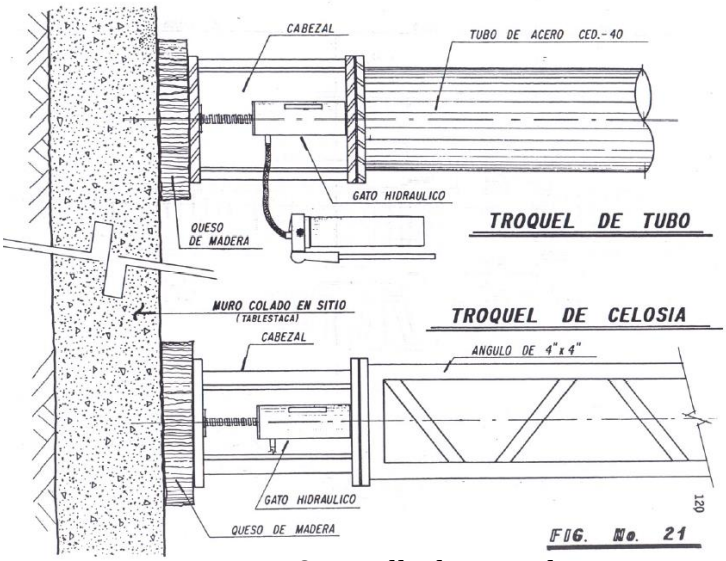


Fig. 28. Detalle de troqueles

Fig. 29. Muros milán apuntalados con troqueles

3.3 Bermas

El método berma-talud para realizar una excavación consiste en excavar primero la parte central del sitio y mantener el suelo cerca de los muros de retención para formar taludes, después construir la estructura principal en la parte central, excavar en la parte de los taludes e ir colocando puntales entre los muros de retención y la estructura principal, luego retirar los puntales para poder construir las demás partes de la estructura.

Éste método debe utilizarse en lugares con espacios suficientes y métodos de construcción que consideren la ubicación de la estructura principal. Los anchos e inclinaciones de los taludes deben ser determinados de tal manera que no se presenten fallas de talud. A pesar de que no se produzcan fallas en la pendiente, la resistencia ofrecida por los taludes es más pequeña que en un estado normal, este hecho provocará una mayor desviación o asentamientos en la superficie del suelo, por lo cual es necesario un análisis antes de la excavación para la correcta protección de las colindancias.

El mayor inconveniente son las posibles fugas de agua o la baja resistencia de las juntas entre la estructura principal y las otras estructuras alrededor, además, grandes deflexiones y movimientos de suelo pueden ocurrir especialmente en suelos blandos.

Fig. 30. Excavación núcleo central con berma-talud perimetral

Fig. 31. Excavación para segundo nivel de apuntalamiento

3.4 Losas estructurales (Top-down)

El método top-down consiste en erguir columnas y levantar losas, justo después de cada excavación. Las losas son estructuras permanentes que reemplazan los puntales de acero temporales, de esta forma se termina de construir la estructura subterránea al mismo tiempo que se termina con el proceso de excavación. La estructura subterránea se construye de la parte superior a la parte inferior, siendo totalmente opuesto al método convencional para la construcción de una cimentación.

Las losas usadas en el top-down son más pesadas que los puntales de acero utilizados en una excavación convencional, adicionalmente, la superestructura, que es construida simultáneamente durante la excavación, pone más peso en las columnas. Así, la capacidad de carga de las columnas es considerada, como resultado, las cimentaciones con pilas a menudo son elegidas para este método. El procedimiento constructivo típico del sistema top-down se puede describir como:

1.- Construcción del muro de retención
2.- Construcción de las pilas. Colocar las columnas de acero donde se construyan las pilas.

3.- Se procede con la primera etapa de excavación.
4.- Colar la losa de piso del primer nivel de sótano.
5.- Se comienza la construcción de la superestructura.
6.- Se procede con la segunda etapa de excavación y la losa del segundo nivel de sótano.
7.- Se repite el mismo procedimiento hasta llegar a la profundidad de proyecto
8.- Construir las losas, trabes y demás elementos de la cimentación hasta completar los sótanos.
9.- Continuar construyendo la superestructura hasta finalizarla

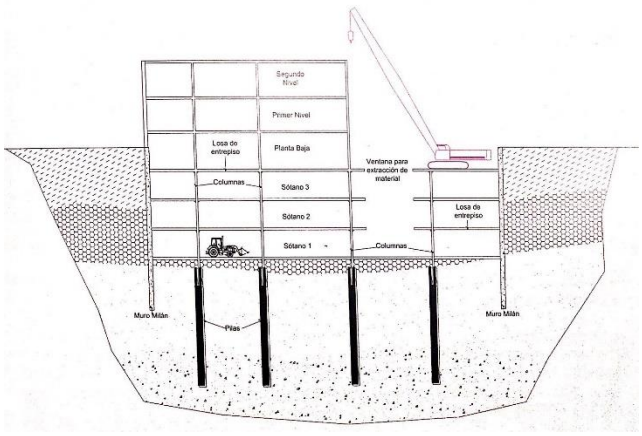


Fig. 32. Esquema del sistema top-down

Fig. 33. Top-down Museo El Chopo, México

3.5 Autosoportables (muros circulares)

Recientemente también se ha utilizado la construcción de muros circulares que cumplen con la función de autosoportar su estructura, a pesar de que estos muros no necesitan apuntalamiento, tienen la desventaja de ser rigurosamente circulares por lo que es difícil su instalación, sobretodo si el proyecto considera otra geometría.

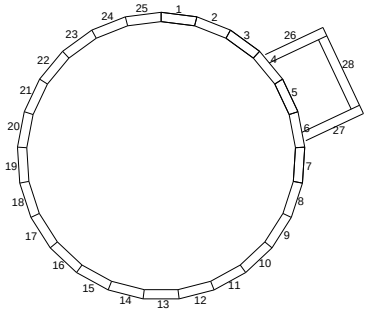


Fig. 34. Excavación circular con muro milán

Fig. 35. Muro milán autosoportable en estructura circular

3.6 Otros métodos

Se pueden usar algunos otros métodos como el ejemplo de la Fig. 36. que muestra un muro permanente en un sitio con una sobrecarga en los edificios adyacentes donde no es posible colocar anclas ni puntales; o el de la Fig. 37. que muestra un proyecto donde se utilizaron pilas oblongas postensadas.

Fig. 36. Muro sin anclas y sin troqueles

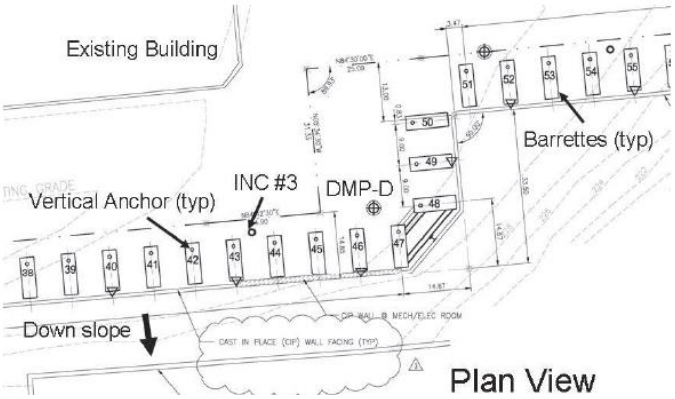


Fig. 37. Proyecto con pilas oblongas postensadas

4. CONCLUSIONES

La acelerada evolución de las cimentaciones profundas en los últimos años, generada por los avances en la tecnología y la demanda de edificios cada vez más altos que representan mayores retos para la ingeniería, ha resaltado la importancia de diseñar los proyectos, eligiendo los métodos más seguros y adecuados de contención y apuntalamiento para las excavaciones, así como seguir las recomendaciones sobre los procedimientos constructivos para llevar a cabo estos métodos de una manera correcta y así proteger el interior y el exterior de la excavación.
Finalmente, en la Tabla 1. se presenta una comparativa de las principales cualidades de cada sistema de contención, asimismo en la Tabla 2. se presentan las cualidades de los sistemas de apuntalamiento mencionados en este artículo.

TABLA 1. Comparativa cualitativa de sistemas de contención.

Sistema	Rigidez	Impermeabilidad	Costo relativo	Instalación	Suelos
Muro milán colado en sitio	Muy buena	Sí	Alto	Difícil	Todos
Muro milán prefabricado	Buena	Sí	Muy alto	Difícil	Todos
Tablestaca de concreto	Media	Sí	Alto	Media	Cohesivos blandos Granulares sueltos
Tablestaca de acero	Buena	No	Alto	Fácil	Cohesivos N < 15 Granulares N < 40
Pilas secantes	Buena	Sí	Alto	Difícil	Todos
Pilas tangentes	Media	No	Medio	Fácil	Todos
Pilas separadas	Baja	No	Bajo	Fácil	Cohesivos Granulares F > 12%
Concreto lanzado	Baja	No	Medio	Fácil	Cohesivos Granulares F > 12%
Soil mixing	Buena	Sí	Medio	Difícil	

TABLA 2. Comparativa cualitativa de sistemas de apuntalamiento.

Sistema	Condiciones de proyecto	Ventajas	Desventajas	Costo relativo	Instalación	Suelos
Anclas	Colindancias subterráneas libres	Excavación de núcleo a cielo abierto	Afectación a colindantes	Medio	Media	Granulares Roca F < 40%
Puntales	Ancho de excavación pequeño	Limitación en desplazamientos horizontales	Pocos usos Pandeo horizontal/vertical	Alto	Media	Todos
Bermas	Dimensiones en planta amplias	Bajo costo	Flexible Excavación lenta al final	Bajo	Fácil	Cohesivos
Top-down	Dimensiones amplias No es posible utilizar anclas	Limitación en desplazamientos horizontales Compresión del programa	Excavación núcleo lenta y costosa	Medio	Difícil	Todos
Autosoportados	Geometría de la estructura circular	No requiere apuntalamiento	No permite otra geometría en el perímetro	Bajo	Difícil	Todos

Referencias

Santoyo, E., and Segovia, J.A., 2002. Muros Milán, Manual de Construcción Geotécnica, Capítulo 2. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, Vol. 1., pp. 57-184.

Paniagua, W.I., and Segovia, J.A., 2002. Tablestacas, Manual de Construcción Geotécnica. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, Vol. 1., pp. 203-225

Chang-Yu Ou., 2006. Deep Excavation Theory and Practice, pp. 57-88.

Paniagua, W.I., 2017. Procedimientos Constructivos, Ingeniería de Cimentaciones Profundas, Capítulo 5. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México, Vol. 1., pp. 347-353

Bracamontes, R., 2002. Concreto Lanzado. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., pp. 1-48.

Denies, N., and Huybrechts N., 2017. Deep mixing method for the construction of earth and water retaining walls. RILEM, technical letters.

Denies, N., Huybrechts N., De Cock, F., Lameire, B., Maertens, J., Leuven, KU., and Vervoort, A., 2012. SOIL MIX WALLS as retaining structures – Belgian practice. International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels.