

## Subtema 2.1. Excavación del muro Milán

En este subtema se exponen las características constructivas de la etapa de excavación de los tableros del muro Milán, así como el equipo utilizado, el control de calidad de los materiales que se emplean y las especificaciones de proyecto que conciernen a dicha actividad.

Para la etapa de excavación de los tableros de la construcción del muro Milán de la Lumbra 19, se utiliza la Hidrofresa Bauer modelo BC-40. Este es el primer proyecto en el que se utiliza este tipo de equipo perforador en Latinoamérica. Este modelo de Hidrofresa tiene una capacidad máxima de excavación de 120 m de profundidad. En la Lumbra 20 (construida previo al inicio de la Lumbra 19) se empleó esta profundidad de excavación con la hidrofresa. Las dimensiones de las excavaciones que realiza esta maquinaria son de 1.20 m de ancho por 2.80 m de largo.

De manera conjunta con la hidrofresa se debe tener en operación una planta de lodos, debido a que se debe producir lodo bentonítico para mantener ademada la excavación durante todo el proceso de excavación, así como durante la inmersión del acero de refuerzo y el colado del tablero.

Las partes principales de la hidrofresa que participan en el proceso de excavación de los tableros se mencionan a continuación:



Hidrofresa BC-40

- Cabezal de Corte. Es el elemento que se introduce dentro de la excavación y se conforma a su vez de las ruedas de corte, la bomba de succión y los gatos hidráulicos para el direccionamiento de la excavación.
- Ruedas de Corte. La hidrofresa cuenta con dos pares de ruedas de corte y se ubican en la parte inferior del cabezal de corte. Su función es la de triturar el material del suelo a medida que el cabezal va descendiendo dentro del tablero. Para realizar esta actividad cuentan a su vez con dientes de corte, los cuales están expuestos a un desgaste. Estos dientes de corte se cambian cada vez que es necesario, aproximadamente cada 200 m<sup>3</sup> excavados (dependiendo del material en el que se trabaje).



Ruedas de corte. Vista frontal.

- Bomba de Succión. Se encuentra también en la parte inferior del cabezal de corte, entre las ruedas de corte. La función de la bomba de succión es la de enviar el material producto de la excavación (rezaga) al exterior de la excavación.
- Manguera de Succión de material. Conduce el material producto de la excavación desde la bomba de succión hasta la tubería de la planta de lodos, en el exterior de la excavación. La manguera de succión es flexible y de un diámetro de 6”.

- Mangueras Hidráulicas. Son diez mangueras flexibles de 2" de diámetro. Cumplen la función de controlar los gatos hidráulicos que se encuentran en el cabezal de corte.
- Gatos Hidráulicos para direccionar el cabezal de corte. Se localizan en la parte superior y en la parte inferior del cabezal de corte. Sirven para direccionar el cabezal de corte dentro de la excavación y evitar las desviaciones de la misma.
- Cabina de operación. Es donde se controlan las demás partes de la hidrofresa. Cuenta con una consola o *display* en el que se muestran datos acerca de la excavación, como la profundidad, el avance o rendimiento que se tiene por minuto, la velocidad de giro de las ruedas de corte, la desviación del cabezal de corte con respecto a la vertical en ambos ejes X y Y.

Las dimensiones de las ruedas de corte son 1.40 m de diámetro y 0.55 m de ancho; con estas dimensiones se obtiene la dimensión final de la excavación que es, como se mencionó anteriormente, de 1.20 m por 2.80 m.

Las ruedas de corte giran en sentidos contrarios, de tal manera que el material producto de la excavación o "rezaga" se acumule en medio de estas y sea succionado por la bomba que se encuentra en este lugar. La pichancha de dicha bomba permite la entrada de gravas de hasta 2 ½" de diámetro, de tal manera que no se presentan taponamientos en la manguera de succión.



Pichancha de la bomba de succión.

Esta bomba conduce el material producto de la excavación a través de la manguera de succión hasta la planta de lodos. Ahí, el material succionado por la bomba se criba para devolver lodo bentonítico al tablero. El nivel del lodo dentro del tablero durante todo el proceso de excavación debe ser de 50 cm por debajo del nivel del brocal, para mantener el empuje hidrostático sobre las paredes de la misma y así evitar tener desprendimientos o caídos de material hacia el interior de esta.

La hidrofresa cuenta con un sistema automático con el que se ajustan la velocidad de descenso del cabezal y el gasto de succión de la bomba, que será el mismo gasto de lodo suministrado al tablero proveniente de la planta de lodos. La velocidad de descenso del cabezal cuando este se encuentra excavando, se puede considerar como un rendimiento. Este rendimiento para los tableros secundarios oscila entre los 5 y los 12 cm/min y entre los 3 y los 6 cm/min para los tableros primarios. El rendimiento de excavación en los tableros primarios difiere de los secundarios, debido a que en los secundarios se realiza la excavación en suelo virgen, mientras que al excavar los tableros primarios se tritura parte del concreto colado previamente en los tableros secundarios. Esto se presenta en la Figura 2.1.a.

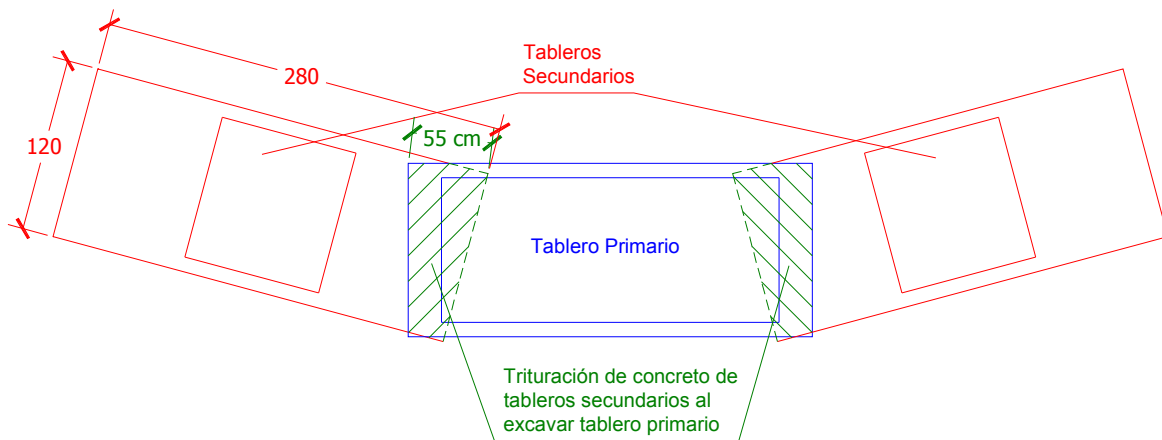


Figura 2.1.a. Excavación de tablero primario.

Es importante también mencionar que las ruedas de corte de la hidrofresa, debido a la disposición de los “dientes” de corte, va realizando ranuras en la excavación; en el proceso de excavación de los tableros primarios, dichas ranuras quedan impresas en el concreto de los tableros secundarios adyacentes. Estas ranuras van a ser rellenadas de concreto cuando se cuele el tablero primario. Lo anterior le ayuda a garantizar una mejor unión entre los tableros, ya que estas ranuras

trabajan como un machihembrado dentro del concreto, para formar una junta que dé continuidad entre los tableros.



Vista lateral de las ruedas de corte y disposición de los dientes de corte.

La Hidrofresa cuenta con un sistema que mide la inclinación del cabezal en ambos ejes (X y Y). En ocasiones, durante el proceso de excavación, las ruedas de corte encuentran estratos irregularmente resistentes de suelo; esto provoca que el cabezal de corte adquiera cierta inclinación involuntaria, intentando evitar cortar masas duras de suelo, o en otras palabras, el cabezal de corte tiende a excavar en las masas de suelo menos resistentes. Para evitar esta inclinación y garantizar la verticalidad de la excavación, el cabezal de corte cuenta con 12 gatos hidráulicos, 6 ubicados en la parte inferior y 6 en la parte superior del mismo. La tarea de estos gatos hidráulicos es la de direccionar el corte



Gatos hidráulicos en cabezal de corte.

apoyándose para esto en las propias paredes de la excavación.

Además de esto, como se mencionó con anterioridad, se verifica la verticalidad del tablero. Para esto se usa un aparato de medición, denominado Monitor Ultrasónico de Perforación de Pozos para la Construcción (DM-602/604 ultrasonic drilling monitor for construction), modelo DM-602, marca KODEN. A lo largo del proceso de excavación del tablero se realizan 3 lecturas con dicho aparato, una a los 35 m, otra a los 70 m y la última a los 100 m de profundidad (que es la capacidad máxima de funcionamiento de esta herramienta). Este aparato consta de un emisor-receptor de señales ultrasónicas y una impresora de las medidas registradas por el primero. El procedimiento de la toma de lecturas consiste en descender lentamente el emisor-receptor en el interior de la excavación. Por medio de la impresora se obtiene una gráfica de la trayectoria de cada uno de los cuatro lados de la excavación.



Verificación de la verticalidad de la excavación con el KODEN

Para la toma de lecturas con el KODEN se requiere que el tablero contenga lodo ligero, por lo que previo a realizar la verificación de la verticalidad en cada uno de los tres eventos por tablero, se debe cambiar el lodo usado para excavar, por lodo nuevo.

Una vez que la Hidrofresa alcanza la profundidad de proyecto, se procede a cambiar el lodo pesado por lodo ligero; para esto se detiene el descenso del cabezal y se continúa el bombeo del material del fondo de la excavación inyectando en esta ocasión lodo nuevo al tablero.

Una vez que se verifica que el lodo dentro del tablero tiene las características de proyecto, se detiene la succión de lodo del fondo y por consiguiente el vaciado de lodo nuevo al tablero. Entonces se transita la hidrofresa para posicionarse en el siguiente tablero donde se ha de iniciar la excavación. Antes de iniciar la excavación de un nuevo tablero se revisa el desgaste de los dientes de corte, el funcionamiento de los gatos hidráulicos, los niveles de aceites (hidráulico, de transmisiones, etc.), el estado de las mangueras, y otros aspectos del estado de la hidrofresa. Esto se realiza para tener un desempeño y rendimiento óptimos durante la excavación.

Al terminar la excavación, se procede al izaje e inmersión del acero de refuerzo dentro del tablero. Esta etapa se explica en el Subtema 2.2. Acero de Refuerzo.

### Apartado 2.1.1. Planta de lodos

Debido a que el tablero siempre se debe mantener lleno de lodo bentonítico, tanto durante el proceso de excavación como en los procesos de inmersión del acero de refuerzo y colado, se requiere tener en funcionamiento una planta de lodos. Con los equipos que forman la planta de lodos, los operadores realizan diferentes actividades para satisfacer las necesidades de cada una de las etapas de la construcción del muro Milán. Como ya se mencionó con anterioridad, en las diferentes etapas se ocupan dos tipos de lodo bentonítico: el lodo ligero o nuevo y el lodo pesado. En el apartado siguiente se tratará el tema de las características de estos dos tipos de lodo bentonítico.

Para almacenar el lodo bentonítico, se tienen 3 tinas con capacidad de 500 m<sup>3</sup> cada una. El lodo ligero se almacenará en una de las tinas y las otras dos se ocuparán para almacenar el lodo pesado.

Para iniciar el proceso de excavación del primer tablero, se deberá preparar lodo bentonítico suficiente para mantener ademada la excavación. Por obvias razones, este lodo es ligero. Para preparar este lodo bentonítico se necesita de bentonita sódica deshidratada (en estado seco) y agua. Para realizar este proceso, se utiliza el dosificador, el mezclador y la tina No. 1. En estos equipos se dosifican el agua y la bentonita, se mezclan para obtener una mezcla homogénea y se almacenan en la tina No. 1.

Con este lodo se inicia la excavación del primer tablero. Durante el proceso de excavación, el lodo que se succiona con la bomba ubicada en el cabezal de corte, está contaminado con partículas de suelo que se pueden clasificar por su tamaño en gravas y arenas. Este lodo contaminado se hace pasar por la criba y los dos desarenadores, donde se retienen las gravas y las arenas o “rezaga”, depositándola en un patio de rezaga donde se extiende para que pierda humedad; de este lugar se retira hacia su disposición final o “tiro” en camiones volteos de 16 m<sup>3</sup> de capacidad.

El lodo resultante es el llamado lodo pesado, ya que, aunque prácticamente no tiene partículas de suelo, su densidad es muy alta en comparación con el lodo recién preparado. Este lodo se puede utilizar sin problemas para el proceso de excavación de los tableros; sin embargo, no es útil para los procesos de inmersión de acero de refuerzo y colado. Esto es porque el lodo bentonítico pesado disminuiría la adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto. También es conveniente utilizar lodo ligero para verificar la verticalidad del tablero con el Koden, ya que no se tienen partículas de suelo que podrían interferir con las



señales ultrasónicas emitidas por el aparato. Este lodo pesado se bombea hacia la excavación para mantener el nivel de lodo dentro del tablero.

Cuando se tiene completada la excavación del primer tablero, se cambia el lodo pesado por lodo recién fabricado. El lodo pesado que se saca del tablero se almacena en las tinas dos y tres para utilizarlo en la excavación del tablero siguiente.

Debido a que se utiliza lodo ligero para cada una de las lecturas con el KODEN y también al finalizar la excavación, se prepara una cantidad grande de este lodo nuevo, el cual no puede ser almacenado en su totalidad; por esto se retira lodo bentonítico pesado hacia el tiro en pipas herméticas de diferentes capacidades.

#### Apartado 2.1.2. Características del lodo bentonítico.

Al igual que otros materiales utilizados en la construcción como el concreto o el acero de refuerzo, al lodo bentonítico se le realizan diversas pruebas de laboratorio que sirven para llevar monitorear su calidad. En estas pruebas se verifican los valores que se tienen de algunos parámetros importantes para los diferentes procesos constructivos. Se había mencionado que es importante que para las etapas de inmersión del acero de refuerzo y colado es necesario tener un lodo bentonítico con una densidad de  $1.07 \text{ ton/m}^3$ , debido a que si la densidad es mayor, es posible que se tengan residuos de bentonita que permanezcan adheridos al acero de refuerzo y que no sean desplazados durante el colado, lo cual provocaría una pérdida de la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo.



Muestra de lodo bentonítico

Otro parámetro que debe tener especial cuidado, principalmente para la etapa de colado, es el contenido de arenas. La razón es la siguiente: se tiene que el armado de los tableros llega hasta una cota de -110.90 m con respecto al nivel del brocal

(n. b.); a partir de allí, se tiene un recubrimiento de 10 cm, llegando a -111.0 m y una sobreexcavación de 1.0 m, para alcanzar los 112.0 m de profundidad; también se tiene que en estado de reposo, las arenas que contenga el lodo bentonítico se decantarán y acumularán en el fondo de la excavación mientras se coloca el armado dentro del tablero, llenando así el volumen de la sobreexcavación; se debe tener un valor de contenido de arenas tal que estas no superen el nivel de la sobreexcavación; si se tiene un volumen total de lodo bentonítico dentro de la excavación de  $376.32 \text{ m}^3$ , y un volumen sobreexcavado de  $3.36 \text{ m}^3$ , resulta un 0.89 % de contenido de arenas que sería admisible para realizar sin problemas la etapa de colado del tablero. Por esta razón es conveniente tener un 0.5% de contenido de arenas como valor máximo.



Prueba de densidad del lodo bentonítico

También se realizan monitoreos de otras características del lodo como la viscosidad y el pH. La primera mide la resistencia que presenta el lodo a fluir y nos indica la velocidad con la que puede filtrarse el lodo dentro del suelo por las paredes de la excavación, lo que implica pérdidas de material. La segunda es importante ya que, con el valor del pH del lodo, se puede detectar la presencia de elementos dentro del suelo que podrían ocasionar afectaciones al entrar en contacto con el lodo bentonítico, como la coagulación del lodo o la separación de la bentonita y el agua.

Para realizar la medición de estos parámetros se obtiene una muestra del lodo que se está extrayendo del fondo de la excavación, con la bomba de succión que se encuentra en el cabezal de corte de la Hidrofresa. Se realizan las pruebas con los equipos correspondientes, los cuales se muestran en las figuras de este apartado.



Prueba de contenido de arenas del lodo bentonítico

Se acaban de describir las características del lodo ligero, es decir, el que se tiene para las etapas de inmersión del acero de refuerzo y colado del tablero; con respecto a las características del lodo pesado, o sea, el que se utiliza durante la excavación de la Hidrofresa, se tiene una densidad que varía entre 1.07 y 1.25  $\text{ton/m}^3$ . Estos valores de densidad son convenientes para mantener la estabilidad de las paredes de la excavación, ya que ejercen un empuje suficiente para resistir la presión del agua subterránea. Es importante mencionar que una vez que se cambia el lodo pesado por el ligero dentro de la excavación, es necesario tener completamente colado el tablero dentro de las siguientes 48 horas. Esto obedece a que el lodo bentonítico nuevo tiene una densidad muy baja y se tiene el riesgo de tener desprendimientos de material de las paredes de la excavación hacia el interior de esta.

### Apartado 2.1.3. Excavación inicial

Para comenzar la excavación de un tablero es necesario que la bomba que se encuentra en el cabezal de la Hidrofresa esté succionando el material producto de la excavación desde el inicio. Para esto se debe tener una excavación de 2.50 m de profundidad como mínimo y debe estar llena de lodo bentonítico para comenzar la excavación. Esta preexcavación se realiza por medios manuales o con maquinaria (retroexcavadora).