

## **CAPÍTULO VI FUNCIONAMIENTO DEL ESCUDO Y ACTIVIDADES INVOLUCRADAS ANTES Y DURANTE SU OPERACIÓN**

El utilizar un escudo como medio de perforación de un túnel involucra varias actividades necesarias para que éste pueda funcionar adecuadamente y para que el proceso de excavación se realice de forma eficaz.

Ya que la longitud total a excavar, para la Línea 12 de la Ciudad de México, es grande (se realizará en aproximadamente 21 meses) se dividirá en 3 tramos para su ejecución, la tabla 6.1 muestra la longitud, recorrido y duración de cada tramo.

TRAMO	LONGITUD	RECORRIDO	DURACION	INICIO	FIN
1	2286.254m	Lumbrera de Entrada- Estación Ermita.	208 días	20/01/2010	24/08/2010
2	2265.375m	Estación Ermita-E. Parque de los Venados	174 días	25/08/2010	22/02/2011
3	1819.172m	E. Parque de los Venados- Lumbrera de Salida	230 días	23/02/2011	21/10/2011
Total	6370.801m		612 días		

Tabla 6.1 "Programa de excavación de la Lumbrera de entrada a la de salida".

A continuación se describirán las actividades a realizar antes y durante la operación del escudo.

### **6.1 Tratamiento Geotécnico Previo al Paso del Escudo**

Antes de iniciar el proceso de excavación es necesario dar un tratamiento geotécnico a todas las entradas y salidas de las estaciones así como a las lumbreras, ya que el suelo natural por el que atraviesa el túnel es blando y tiene una resistencia baja a la compresión, es por tal motivo que se da este tratamiento con la finalidad de elevar su resistencia y evitar colapsos del terreno al entrar el escudo.

El tratamiento geotécnico consiste en realizar la sustitución del suelo natural por pilas elaboradas con una mezcla suelo-cemento, la cual deberá tener una resistencia a la compresión simple de  $20 \text{ kg/cm}^2$  como mínimo al menos dos días antes de que el escudo cruce por la zona mejorada.

La dosificación propuesta del suelo-cemento para alcanzar la resistencia de  $20 \text{ kg/cm}^2$ , es la siguiente:

- Cemento 118kg
- Tepetate 1,050 kg
- Agua 437 litros
- Aditivo FSR 1.77 kg (1.5% en peso del cemento).

La excavación para el remplazo, se realizará mediante perforaciones de 1.5m de diámetro, excavados con maquinaria para pilas de cimentación, la demolición de las ventanas circulares para el lanzado y recepción del escudo se podrá iniciar cuando el material de remplazo haya alcanzado una resistencia mínima de  $20 \text{ kg/cm}^2$ .

### **6.2 Estructura de Atraque**

Una vez que se haya ensamblado el escudo y se hayan accionado todos los sistemas del equipo, se está en condiciones de iniciar con los trabajos de excavación del túnel, procediendo a la colocación de los primeros anillos de atraque.

En primera instancia se procede al retiro del segundo lecho de acero del muro Milán correspondiente a la zona por excavar, ya que el primer lecho de acero del muro se retira

cuando todos los recursos básicos del equipo se están instalando y cuando el tratamiento geotécnico haya alcanzado la resistencia mínima de 20 kg/cm<sup>2</sup>.

Posteriormente se procede al empuje del escudo contra el muro Milán que sigue aparente en la zona por excavar y se monta, detrás del escudo, la estructura de atraque incluyendo el anillo metálico.

La colocación de la estructura de atraque inicia con la bajada de las dovelas del primer anillo, la cual es pieza por pieza. Las piezas se introducen por el cajón subterráneo mediante un vagón de dovelas.

Las dovelas son trasladadas del vagón a la mesa de traslación mediante un polipasto que recorre la parte central del Puente del Escudo. El brazo erector del escudo EPB, tendrá acceso a las dovelas en la extremidad delantera de la mesa de traslación, y así levantará la dovela, mediante el sistema de vacío para colocarla en su posición de armado. Una vez colocada se retirará el brazo erector y se moverá para tomar y colocar la siguiente, sujetándola a la primera dovela mediante tornillos que se sujetan a los insertos “tuerca” instalados en la propia dovela.

Este mismo procedimiento se realizará para la colocación de las cinco dovelas tipo “A”, las tipo “B” y “C” y la tipo “K” en forma de cuña, hasta configurar el primer anillo circular.

Es importante mencionar que la colocación de los anillos de atraque no es una labor fácil ya que son los primeros que se colocan y todavía no cuentan con la estabilidad suficiente para sostenerse, es por eso que cuando se van colocando las dovelas del anillo, el faldón por medio de unos ángulos ayuda a darle forma al anillo y sirve como sostén, en los anillos de atraque no solo es suficiente el machihembrado y los tornillos que se tiene para su acoplamiento, además se deben de colocar placas metálicas en las juntas longitudinales, con la finalidad de que ayuden a la rigidez del anillo.

Estando debidamente colocado el anillo de atraque y en contacto tanto con los cilindros de empuje del escudo como con la estructura de reacción (marco), se procederá a realizar el empuje del escudo, accionando los gatos hidráulicos del escudo, hasta que se tenga en el faldón un espacio suficiente para la colocación del segundo anillo de atraque, el cual se colocará de forma similar al primero, este proceso se tendrá que repetir hasta que se tengan los seis anillos de atraque.

### 6.3 Excavación de los primeros metros

Una vez que el escudo haya tenido contacto con los anillos de atraque y la estructura de reacción, se procede a verificar que el sello de salida instalado en el portal y/o estaciones cubra uniformemente la camisa del escudo, para así iniciar la presurización de la cámara e iniciar con la excavación de los primeros metros del túnel.

Ya teniendo el escudo en contacto con el tratamiento geotécnico se procede a excavarlo con el cortador accionado en baja revolución para comenzar con el empuje. Se accionan los gatos de empuje del escudo en baja velocidad. A medida de que el cortador se acerque al final de la zona de tratamiento, se verifica que la presión del cortador no exceda la presión propia del terreno, especialmente cuando se empieza a excavar el terreno no tratado.

La carrera de los gatos se verifica revisando lo indicado por los sensores de desplazamiento colocados en 4 gatos (1, 8, 15 y 22) y manualmente en cuatro ubicaciones opuestas como mínimo, para corroborar el correcto desplazamiento del escudo.

Al tener en la carrera de los gatos un desplazamiento mínimo de 1.60 metros se procede a su paro, lo cual significa que el empuje ha concluido, procediéndose a la colocación de dovelas siguiente.

Al término de cada empuje se verifica en el sistema de guiado automático la posición real del escudo y se compara con la del proyecto, lo cual da la pauta a seguir para la programación de la colocación del anillo de dovelas antes del siguiente empuje y corregir así la posición del escudo.

Para la colocación de los anillos subsecuentes (estructurales o de soporte) se realizan las siguientes actividades:

- a) Se retraen los gatos del escudo ubicados en la posición donde se coloca la primera dovela tipo "A".
- b) La dovela es tomada por el brazo erector, previamente se verifica que cuente con los tornillos necesarios para la colocación de la misma, procediendo con la colocación de la dovela en su sitio correspondiente y fijando la tornillería a los insertos "tuercas".

- c) Se apoyan dos, tres o cuatro gatos a la dovela dependiendo de la posición de la misma para poder retirar el brazo erector, trasladándolo para posicionarse en la siguiente dovela por colocar.
- d) Se retiran los gatos necesarios para alojar la segunda dovela tipo “A”.
- e) Se hacen coincidir el orificio del tornillo con el del inserto “tuerca”, colocando los tornillos correspondientes.
- f) Nuevamente se apoyan dos, tres o cuatro gatos de acuerdo con la posición de la dovela, se retira el brazo erector para desplazarse a la siguiente dovela situada sobre la mesa de traslación.
- g) Se repetirá la misma secuencia descrita hasta colocar las cinco dovelas tipo “A”, las dovelas tipo “B” y “C” y la cuña “K” dentro del faldón del escudo.
- h) Estas actividades serán repetidas para la colocación de los anillos durante todo el proceso de excavación del túnel, procurando que las dovelas no se traslapen en las juntas para que no se formen líneas de fallas longitudinales por la posición repetitiva de los anillos. Cabe mencionar que todas las posiciones de los anillos que se utilizan son para formar las curvas existentes y/o para corregir la línea o nivel en caso de existir desviaciones del trazo teórico.

Cabe recordar que el anillo de dovelas de diseño es un anillo universal, de manera que por medio de sus catorce posiciones posibles permiten seguir las curvas o tangentes del trazo y perfil del proyecto.

Una vez colocado el anillo, se está en condición de realizar otro empuje o avance, el cual comienza con el giro de la cabeza de corte y el empuje de los cilindros.

Al excavar el terreno, éste se introduce y se presuriza convenientemente en la cámara frontal del escudo EPB, para posteriormente ser evacuado, también bajo control, a través de los tornillos sinfín (Nos. 1 y 2). Durante el tiempo que el terreno permanece atrapado en el frente del escudo EPB, se le pueden añadir aditivos que le proporcionen propiedades especiales para su bombeabilidad y para su trabajo como “sello” en el interior del tornillo sinfín.

Al salir del tornillo sinfín, el material entrará en un sistema de bombas de pistones que lo impulsan por una tubería de acero de diámetro interior 8” hasta la superficie en la zona especial de almacenamiento de rezaga.

Paralelo a la excavación y colocación de anillos, se colocan rieles sobre apoyos metálicos para el avance del back up y una vía de rieles sobre durmientes para la circulación de los

vagones que alimentan dovelas, equipo y demás materiales al escudo, durante los primeros metros de excavación.

La inyección de la mezcla o mortero en el espacio anular comprendido entre el terreno y los anillos de dovelas, se realiza de manera simultánea a la excavación a lo largo de todo el túnel, en los anillos que vayan saliendo del faldón del escudo, con un sistema integral de tuberías de inyección colocadas en el faldón del escudo. Para tal fin se emplea un sistema de inyección basado en el concepto Bi-componente.

#### **6.4 Excavación del túnel en los metros subsecuentes**

Realizada la excavación de los primeros metros del túnel, se verifica el espacio generado por el avance del EPB, para así colocar las instalaciones necesarias dentro del túnel, tales como: el tren del equipo de la EPB, cambios de vía, locomotoras eléctricas y así como todos los recursos necesarios para facilitar e incrementar la eficiencia de la excavación del túnel (iluminación, ventilación, etc.).

Una vez que se hayan bajado los trenes del escudo (back-up) se procede a accionar los gatos de empuje, los cuales reaccionarán con el anillo anterior e impulsan el escudo contra el terreno. La velocidad de avance es regulada con el flujo hidráulico que controla la presión de los gatos de empuje del escudo.

Al cortarse el terreno, éste se introduce y presuriza en la cámara frontal del escudo EPB, para posteriormente ser expulsado bajo control a través de los tornillos sinfín y el sistema de bombas de rezaga.

Cuando el material no permita utilizar el sistema de extracción de rezaga mediante bombeo, se cambiará al sistema de bandas combinado con el empleo de vagones de rezagas movidos por locomotoras, este sistema se utilizará a partir de la Estación Parque de los Venados, ya que el suelo contiene boleos que no pueden ser expulsados mediante el bombeo.

Simultáneo al empuje, se realiza la inyección de la mezcla Bi-componente entre dovelas y terreno, así mismo en la superficie se preparan las siguientes dovelas verificando que no cuenten con posibles desportilladuras ocasionadas por el transporte de las mismas. De igual forma se preparan los tornillos e insertos necesarios para la fijación de las dovelas. Ya que se cuenta con el material necesario este se bajará a la lumbrera sobre los vagones

de dovelas que serán llevados al frente de excavación por medio del polipasto y la mesa de traslación (antes de que en el frente se termine el empuje).

Cuando la carrera de los gatos tenga un desplazamiento de 1.60 metros, se procede al paro del empuje de los gatos, procediéndose a la colocación del anillo siguiente.

Para la colocación de los anillos se lleva la misma secuencia de actividades descritas en el subtema "Excavación de los primeros metros".

Una vez colocando el nuevo anillo se está en condición de realizar otro empuje o excavación, el cual comienza con el arranque del cortador y el accionamiento programado de los gatos, como ya se explico en el subtema anterior.

Una vez que el escudo este por llegar a la siguiente estación de recepción, cien metros antes se tendrá un control más estricto y coordinado con cada actividad para así llegar lo más cerca posible al eje teórico al portal de llegada. Cuando el escudo detecte que ha llegado a la estación o lumbrera se habrá concluido el tramo de excavación con el proceso antes descrito, ya que se involucrarán otras actividades tales como demolición de concreto en el portal de llegada y la liberación de presión en la cámara del escudo.

Teniendo el escudo en la estación se revisará, dándole mantenimiento a todo el equipo necesario, así como el alineamiento con el eje del próximo tramo del túnel por excavar, paralelamente al mantenimiento, se ubicarán las instalaciones pertinentes en superficie para el suministro de recursos básicos durante el proceso de excavación.

Con esta misma secuencia se excavarán los tres tramos de túnel con ayuda de la EPB.

## **6.5 Sistema de inyección bi-componente**

Durante el avance del escudo EPB, se genera un espacio anular entre el revestimiento del túnel y el suelo excavado, debido a la diferencia de diámetros exteriores entre el escudo y el revestimiento de dovelas prefabricadas.

Con el fin de controlar los asentamientos en superficie, garantizar la correcta instalación de las dovelas prefabricadas y permitir una transmisión uniforme de las cargas del suelo sobre el revestimiento es necesario rellenar el espacio anular, lo que se lleva a cabo por

medio de la inyección de mortero a través de los conductos situados en el faldón del escudo.

Este sistema permite combinar una mezcla de mortero (que puede contener un aditivo retardante) con un acelerante en el faldón del escudo. La mezcla de ambos componentes fluye por una corta distancia hasta el final del faldón del escudo en donde encuentra el hueco a ser llenado. Entonces el fraguado y la estabilización de la mezcla Bi-componente se lleva a cabo en un corto tiempo.

Para el funcionamiento del sistema, existen dos tanques en el tren de equipo o “backup” del escudo. Un tanque contiene el mortero premezclado y el otro acelerante, ambos líquidos se transportan por medio de bombas independientes.

El sistema de tubería se compone de dos líneas, una para cada componente. Ambos líquidos se mezclan en la parte final del faldón del escudo y la mezcla bi-componente penetra en el espacio anular. Cada línea dispone de un medidor de flujo y de presión, solo la medición de presión del mortero se utiliza para el proceso de regularización.

La inyección de la mezcla en el espacio anular, se realiza de manera simultánea a la excavación a lo largo de todo el túnel, se inyecta alrededor de los anillos que van saliendo del faldón, por medio de los dos canales de inyección ubicados en la parte superior, con lo que se logra que el mortero llegue a todo el perímetro del faldón; a la parte superior por medio de la presión aplicada a la inyección y a la parte inferior por gravedad.

El volumen teórico de la mezcla de inyección por anillo es igual a  $6.9 \text{ m}^3$ . La inyección se detiene cuando cualquiera de estos dos criterios se cumple:

- a) Volumen real inyectado es igual al volumen teórico más un 10 o 15%.
- b) La presión de inyección alcanza la presión de confinamiento aplicada en la parte superior del frente del escudo.

### 6.5.1 Fabricación de la mezcla de inyección

Para la fabricación de la mezcla de inyección se ha instalado en la superficie vecina a la lumbrera o estación de trabajo una planta de mortero cuyos principales componentes constan de:

- a) Agitador vertical de 2.5 m<sup>3</sup> de capacidad o similar.
- b) Silo para almacenamiento de 70 toneladas de cemento.
- c) Área de almacenamiento de arena fina.
- d) Área de almacenamiento de bentonita en sacos.
- e) Tolva de pesado de los materiales.
- f) Una bomba Moyno 3L-10 o similar.
- g) Un tanque para almacenamiento de agua.

La mezcla bi-componente se constituye de dos elementos principales: el mortero y el acelerante.

- El mortero consiste principalmente en agua, cemento, arena fina y bentonita, puede contener además un aditivo retardante superplastificante que inhibe el fraguado del mortero, manteniendo su trabajabilidad y estabilidad, con lo que se obtiene un flujo fácil y continuo del mortero por la tubería.
- El acelerante es un aditivo listo para usarse que activa el fraguado del mortero e incrementa la viscosidad de la mezcla de cemento. Permite obtener rápidamente una consistencia de la mezcla que evita el colapso del suelo en el espacio anular, llamada consistencia de gelatinización (que en este caso es de 90 segundos). El acelerante se agrega al mortero en una proporción que varía entre el 5 y 7% en volumen.

Cabe mencionar que después de los 149 anillos colocados en el túnel dicha mezcla se cambio por una mezcla de inyección optimizada en donde se suprimió el contenido de arena debido a la abrasión que sufre el sistema de inyección. Con este cambio la resistencia de compresión del mortero se vio afectada ya que paso de 3.47 kg/cm<sup>2</sup> a 2.10 kg/cm<sup>2</sup> (resistencia a un día), la cual es suficiente para evitar el colapso.

## 6.6 Sistema de guiado del escudo

La máquina excavadora EPB está provista de un sistema de guiado que automáticamente determina la posición exacta y la dirección de guiado del escudo en el espacio tridimensional, además de que provee información acerca de la desviación de la máquina respecto de su trayectoria de diseño.

Para definir la ubicación y dirección del escudo, el sistema cuenta con un prisma instalado en la parte delantera de la máquina, cuya posición exacta respecto del eje de la máquina y relativa al sistema coordenado tridimensional local se mide previo al inicio de la excavación.

Para medir la posición relativa del sistema coordenado local del escudo respecto del sistema global de coordenadas, el sistema de guiado mide además el rodamiento y la inclinación de la excavadora por medio de un inclinómetro biaxial montado dentro de la máquina.

El prisma dentro del escudo es medido automática y continuamente por un teodolito cuya posición y orientación en la pared del túnel son definidas por medio de una medición topográfica al momento de la instalación.

El sistema de medición del ángulo horizontal del teodolito deberá ser orientado mediante la instalación midiendo manualmente respecto a un prisma de referencia cuyas coordenadas han sido determinadas previamente.

Toda la información deberá ser introducida a la computadora del sistema de forma manual.

De esta manera se establecerán las coordenadas globales del prisma en el escudo midiendo las distancias y los ángulos vertical y horizontal a partir del teodolito que ya ha sido referenciado. Debido a que desde un inicio se estableció la ubicación del prisma en el sistema coordenado local del escudo y a que tanto la inclinación como el rodamiento de la máquina se conocen en todo momento, la posición de cualquier punto del escudo puede ser calculada en el espacio tridimensional global.

La trayectoria de diseño proyectada en el sistema coordenado global también se conoce y se introduce en la computadora del sistema. En consecuencia, es posible calcular la desviación horizontal y vertical de la EPB respecto a la trayectoria de diseño, así como la

orientación de la máquina, los cuales se le presentan al operador de manera gráfica. De manera opcional es posible mostrar el avance óptimo hacia la trayectoria de diseño.

La figura 6.1 muestra el sistema de guiado automático con el que cuenta el escudo EPB, utilizado en la excavación de la Línea 12.

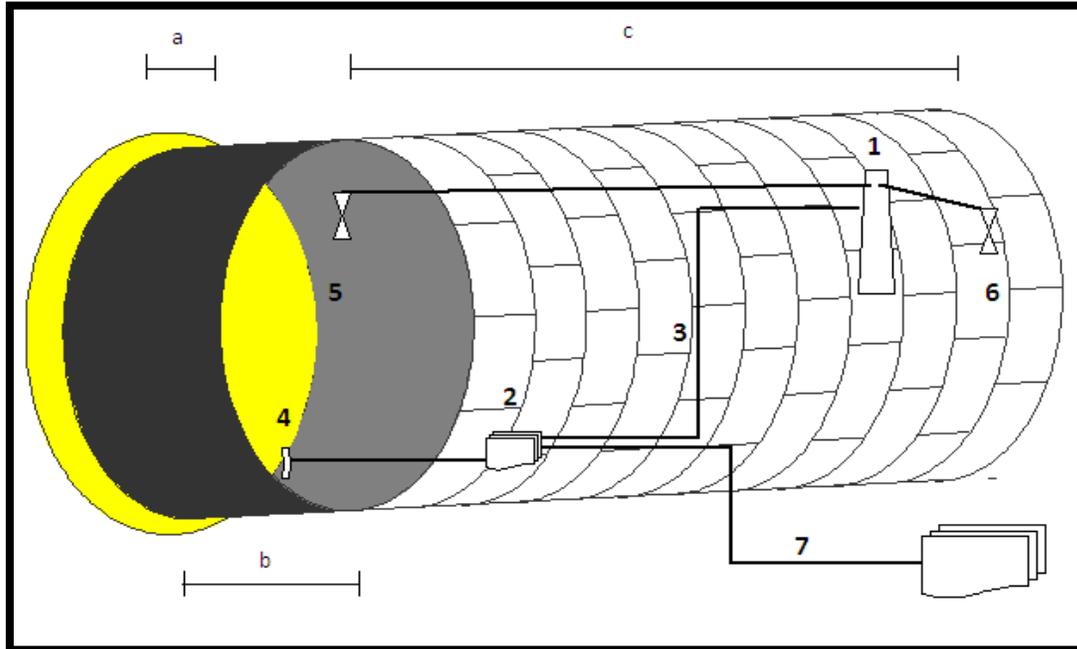


Figura 6.1 Sistema de Guiado Automático.

- a. Cabeza cortadora
- b. Cuerpo y faldón del escudo
- c. Dovelas colocadas
1. Teodolito.
2. Sistema de cómputo dentro del escudo.
3. Transmisión de datos del teodolito a la computadora interna.
4. Inclinómetro
5. Prismas
6. Prisma de referencia para el teodolito
7. Línea de transmisión de la computadora interna hacia la cabina de control.

### 6.7 Control de las presiones en el frente de excavación.

La operación del escudo EPB involucra varios procesos: el relleno de la cámara de excavación con el material excavado, la rotación de la cabeza de corte, la propulsión de los gatos de empuje y el ajuste de volumen de rezaga con el volumen del suelo excavado, por medio del control de la velocidad de la rotación de los tornillos sinfín. De todo ello, la

parte más importante es el control de la presión de tierra dentro de la cámara de corte. El valor de la presión está determinado por las condiciones de la excavación, tales como el tipo de suelo, las características geológicas y geotécnicas del suelo, la presión de agua en el suelo y la profundidad del túnel.

Para llevar a cabo de manera segura la excavación del túnel es necesario llenar la cámara a presión con el suelo excavado con objeto de evitar fallas en el frente, una vez que ya este a presión el suelo en la cámara, la cantidad de rezaga descargada por el tornillo sinfín, debe de ser igual a la cantidad de suelo excavado.

El valor objetivo de la presión de tierra necesaria para mantener la estabilidad del frente se calcula de manera teórica de acuerdo con las condiciones de la excavación antes del inicio de la misma, aunque debe ser revisada de acuerdo con la diferencia de la cantidad de rezaga descargada respecto de la cantidad de suelo excavado. Las presiones de tierra en la cámara de corte para el sostenimiento del frente serán las calculadas para cada zona del túnel.

En el anexo 2, podrán encontrar las presiones de sostenimiento del frente durante la excavación del tramo 1, de la lumbrera de acceso del escudo hasta poco antes de la Estación Ermita.

El proceso de control de las presiones en el frente es como sigue:

- a) Registrar la velocidad de avance del escudo que se da en función del tipo de terreno excavado y de la presión hidráulica aplicada por los gatos de empuje.
- b) Ajustar la velocidad de rotación del tornillo sinfín para descargar la cantidad de suelo en proporción a la velocidad de avance del escudo.
- c) Cuando la presión de tierra en la cámara de corte que se muestra en la pantalla de control salga del rango permisible, la velocidad de rotación del tornillo sinfín deberá ser ajustada (incrementada o disminuida) por el operador. Dicha operación permite mantener la presión de la cámara dentro de los rangos admisibles.
- d) Cuando el volumen medido de la rezaga extraída mostrado en la pantalla de control exceda el rango admisible, se debe revisar el valor objetivo de la presión de tierra y ajustarse por medio de la variación de la velocidad de rotación del tornillo sinfín hasta que el volumen de suelo rezagado recupere su tendencia.

La tabla 6.2 muestra los dos métodos para medir la cantidad de rezaga que se extrae durante la excavación.

Tipo	Dispositivo	Método
Medición de Volumen	Tornillo Sinfín	medición de las revoluciones del tornillo
	Bomba de Lodos	medición de los ciclos de la bomba
Medición de peso	Banda transportadora	medición del peso de la banda por medio de celdas de carga

Tabla 6.2 "Métodos para medir la cantidad me material rezagado"

Las indicaciones importantes para el operador están dadas por los sensores de presión de tierra en la cámara y los dispositivos para la medición de la cantidad de rezaga extraída. Los valores detectados por ambos tipos de sensores se muestran en la pantalla de control comparándolos con el valor objetivo. De acuerdo con la indicación el operador puede modificar la velocidad de rotación del tornillo sinfín.

El escudo cuenta con 10 sensores para medir la presión de tierra, que se encuentran en la cámara de presión, estos sensores se encuentran distribuidos como lo indica la figura 6.2.

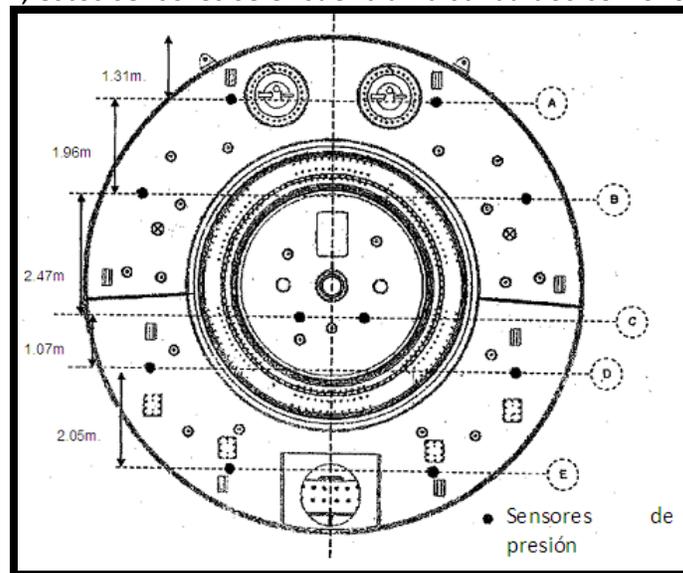


Figura 6.2 Distribución de los Sensores de Presión en la Cámara de Presión.