

## CAPÍTULO III SELECCIÓN DEL ESCUDO.

La selección del escudo es una de las partes más importantes en el proceso de excavación del túnel, ya que de esto dependerá la eficiencia que el escudo llegue a tener.

Para poder elegirlo adecuadamente debemos de tomar en consideración varios parámetros, que nos ayudarán para seleccionar claramente cuál es el ideal, ya que cada túnel tiene características propias.

### **3.1 Parámetros para la Selección del Escudo**

Los siguientes parámetros no solo van dirigidos hacia la selección del tipo de escudo, sino también a elegir de entre diversos fabricantes, ya que generalmente no solo tenemos la oferta de uno solo y debemos de saber elegir al mejor de ellos.

- Trazo y Perfil: Nos van a servir para indicarnos la longitud total a excavar por el escudo, el ángulo de giro (tanto horizontal como vertical) que debe ser capaz de brindar el escudo, tomando en cuenta:
  - Distancia entre lumbreras.
  - Profundidad de lumbreras.
  - Radios de curvatura mínimos horizontales y verticales.
  - Pendiente.

- Geométrico: Este parámetro nos ayudará en el dimensionamiento adecuado del escudo, tomando en cuenta:
  - Diámetro interior terminado del túnel.
  - Diámetro de excavación.
  - Diámetro exterior de dovela.
  - Diámetro interior de dovela.
  - Espesor de dovela.
  - Ancho de dovela.
  - Número de segmentos del anillo de dovelas.
  - Espesor del revestimiento definitivo.
  - Diámetro de lumbreras.
  
- Geotécnico: Este es un parámetro muy importante para seleccionar el tipo de escudo ya que con base en la información geotécnica podemos elegir entre un escudo para suelo blando (EPB), duro (TBM, topo) o mixto (mixshield), tomando en cuenta:
  - Perfil geológico.
  - Características físicas y mecánicas de suelos y rocas.
  - Presiones de agua y tierra en el frente de excavación.
  - Tamaño máximo de boleos.
  - Mineralogía de las rocas.
  - Grado de abrasión de las rocas.

Además de tomar en cuenta estos parámetros debemos de realizar diversos análisis que nos ayudarán a elegir al adecuado de entre varios fabricantes, como los siguientes:

- Análisis de la Propuesta Económica del Fabricante.

Es conveniente elaborar un cuadro comparativo entre los elementos económicos que incluye la propuesta:

- Precio del escudo.
- Precio de los diferentes sistemas.
- Precio de los equipos opcionales.
- Fletes.
- Impuestos de importación.
- Valor de recompra.
- Forma de pago.
- Financiamiento.

- Servicio post venta.
- Capacitación.
- Viáticos.
- Transportes y hospedajes.
- Garantías.

- Análisis de la Propuesta Técnica del Fabricante.

Es necesario elaborar un cuadro comparativo entre las diferentes propuestas de los fabricantes de escudos, de manera que se analice cada uno de los elementos que componen la máquina, para cada tramo de geología similar.

CONCEPTO	TRAMO 1 FABRICANTE "A"	TRAMO 1 FABRICANTE "B"	TRAMO 1 FABRICANTE "C"
1.-TIPO DE ESCUDO	TBM EPB	TBM EPB	TBM EPB
● DIÁMETRO SECCION FRONTAL	10,200 mm		
● DIÁMETRO SECCIÓN FALDÓN.	10,170 mm		
● LONGITUD DEL ESCUDO.	11,383 mm		
● PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN	2.5 BAR		
● SENSORES DE PRESIÓN DE TIERRA.	6		
2.- FALDÓN			
● TIPO DE FALDÓN	ARTICULADO		
● LINEAS DE INYECCIÓN INTEGRADAS	SÍ		
● DIÁMETRO EXTERIOR	10,170 mm		
● SISTEMA DE SELLADO	3 CEPILLOS DE ALAMBRE		

**Tabla 1.1 "Análisis de la propuesta técnica del fabricante"**

El análisis de dicha propuesta técnica permite comparar:

- Componentes y mecanismos.
- Capacidades.
- Consumos. (electricidad, combustibles y lubricantes, herramientas de corte, etc.)
- Versatilidad para incrementar capacidad.
- Componentes incluidos y adicionales.
- Sistemas de control.
- Tiempos de fabricación.

- Análisis de Producción de las Máquinas.

Es necesario elaborar un programa para cada fabricante que incluya los tiempos que serán necesarios para las diferentes etapas de:

- Ensamble del escudo.
- Excavación de los primeros metros.
- Excavación de los metros subsecuentes.
- Llegada a la lumbrera de salida.

Lo anterior permite determinar el rendimiento promedio factible y por ende el número de máquinas que se requieren para poder cumplir con el programa de obra.

Una vez que se seleccionó el tipo de escudo y se finalizó el análisis (técnico, económico y de producción) de cada máquina ofertada se puede elegir correctamente la máquina y fabricante y empezar con el diseño de las instalaciones requeridas para el buen funcionamiento de la misma.

- Instalaciones en Túnel, Lumbrera y Superficie.

De acuerdo al tipo de máquina elegida y a sus demandas, es necesario determinar (diseñar) las instalaciones que se requieren para su operación:

- Energía eléctrica Fuerza.
- Energía eléctrica iluminación.
- Ventilación.
- Aire comprimido.
- Agua.
- Durmientes y vías.
- Tuberías de rezagas (si es el caso)
- Tolvas en superficie.
- Subestación eléctrica.
- Instalaciones de de control y comunicación.
- Elevador de personal.
- Planta generadora de emergencia.
- Transformadores.
- Muros de reacción.

Es conveniente determinar dichas instalaciones en conjunto con el fabricante de la máquina.

- Equipos Auxiliares.

Es necesario repasar con el fabricante el total de equipo auxiliar que se requiere para la adecuada operación de la máquina y sus capacidades:

- Locomotoras.
- Trucks de dovelas.
- Ventiladores.
- Etc.

El no realizar los análisis antes mencionados de manera minuciosa puede traer como consecuencia lo siguiente:

- Mala selección del escudo.
- Mal balance en los equipos de rezaga.
- Falta de capacidad en las instalaciones.
- Sobre costos por no haber estimado de manera adecuada el total de maquinaria auxiliar que se requiere.
- Sobre costo en las instalaciones en túnel, lumbrera y superficie.
- Sobre costo en los consumos.
- No lograr los rendimientos esperados.
- No soportar adecuadamente los precios unitarios durante su elaboración.

### **3.2 Tipo de Escudo Utilizado en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México**

El escudo utilizado en la Línea 12 es un EPB (Earth Pressure Balance), el desarrollo de las EPB comenzó en los años 70's en Japón. La primera EPB fue utilizada en Tokio en 1974, tenía un diámetro externo de 3.72 m. y fue manufacturado por una empresa Japonesa llamada IHI (Ishikawa-jima-Harmia).

Las características ideales que el suelo debe tener para que una EPB trabaje adecuadamente son las siguientes:

- Buena deformación plástica
- Consistencia suave
- Baja fricción interna
- Baja permeabilidad

### 3.2.1 Componentes del escudo EPB utilizado en la Línea 12

La figura 3.1 muestra los componentes del escudo EPB (EPB331-331) utilizado en la excavación de la línea 12.

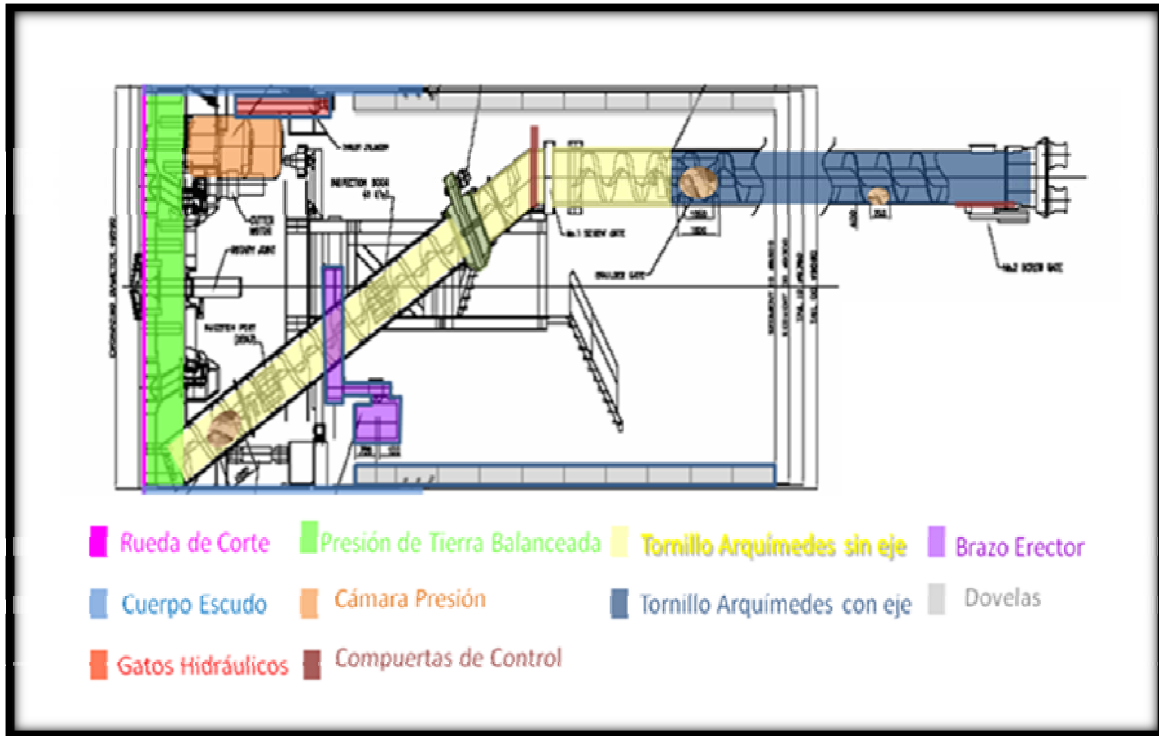


Figura 3.1 Componentes del EPB, utilizado en la excavación de la Línea 12.

El plano del escudo utilizado en la excavación de la Línea 12 lo pueden encontrar en el anexo 1.b “Escudo EPB (EPB331-331)”.

Para entender un poco más cómo es que funciona una Earth Pressure Balance (EPB), se describirá su forma de trabajo.

La figura 3.2 muestra de forma esquemática las principales fuerzas e interacciones en la excavación con escudo EPB. El proceso de excavación se inicia en el frente, donde las herramientas de corte giran con la rueda de corte (1) penetran y rompen el suelo del frente gracias al empuje transmitido a la cabeza cortadora (2) desde los cilindros de empuje del escudo (8). El primer objetivo es que el proceso de corte del suelo se haga de forma efectiva, con el mínimo desgaste de herramientas y el mínimo torque (1). Inmediatamente tras ser cortado, el material excavado debe ser capaz de fluir cómodamente a través de las aberturas de la cabeza de corte hacia la cámara de excavación y hasta el tornillo sinfín o la bomba de extracción. El buen flujo de material es necesario para garantizar un mínimo desgaste secundario de herramientas y una velocidad de avance constante y elevada.

En suelos inestables, es necesario aplicar presión en la cámara de excavación (3) con objeto de estabilizar el frente (como es el suelo de la Ciudad de México). Cuanto mayor es la presión del frente en la cámara (3), mayores serán el torque de la rueda de corte (1) y el desgaste de herramientas, lo cual puede acabar repercutiendo en una disminución de la velocidad de avance. La fuerza resultante de la presión en la cámara (4) reacciona contra el mamparo estanco que además debe ser ayudada por el empuje de los cilindros (8) para enterrarse más en el terreno. La fuerza resultante de presión en la cámara (4), no sólo depende de la presión que se aplique para sostener el frente, sino que depende también de la densidad del material excavado. Por ello, es de crucial importancia mantener la densidad del material en la cámara suficientemente baja, tanto para minimizar la fuerza de empuje (8), como para permitir un adecuado flujo del material a través de la cámara.

Otras fuerzas que deben ser contrarrestadas por la fuerza de empuje total (8) son las fuerzas de fricción con el suelo (5), que pueden ser minimizadas con un adecuado guiado de la máquina y verificando el correcto posicionamiento del faldón del escudo. Además, con la presión a lo largo del escudo (7), que es función de las presiones de frente (3) y de inyección de mortero (6), se puede controlar la deformación del suelo alrededor del escudo y con ello se puede reducir la fricción.

La inyección de mortero (6) no sólo permite controlar la deformación del suelo, sino que ofrece al revestimiento de dovelas el confinamiento necesario para trabajar como anillo. La calidad del revestimiento depende, finalmente también, de la magnitud y distribución de las fuerzas de los cilindros de empuje (8) que, como hemos visto, resultan de todo el proceso.

En definitiva, se puede concluir que existe una estrecha interacción entre los procesos de la excavación con escudo y, al mismo tiempo, con las propiedades del suelo. Para que el Control de Procesos sea efectivo, es necesario comprender y dominar todos los procesos y las interacciones existentes en todo momento.

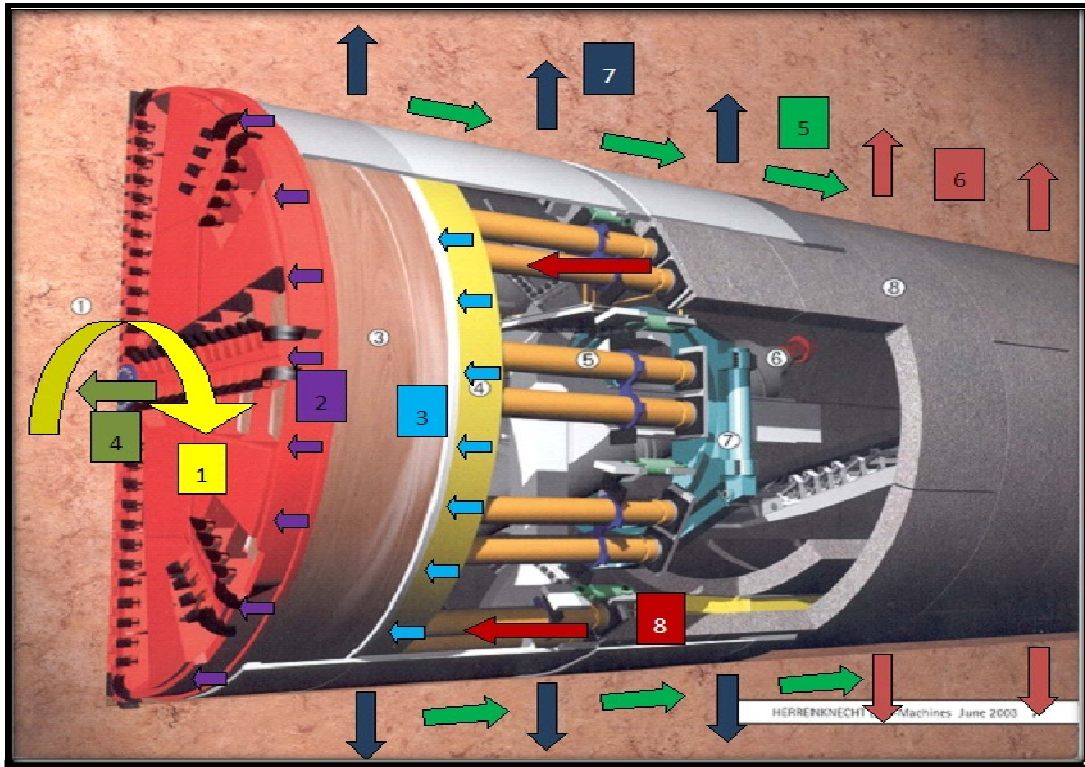


Figura 3.2 Fuerzas e interacciones en la excavación con escudo EPB

### 3.3 Características del Escudo Utilizado en la Línea 12.

La empresa Norteamericana Robbins fue la encargada del diseño, ensamble y puesta en marcha del escudo EPB (EPB331-331) utilizado en la Línea 12, a continuación se presentan las condiciones más importantes de diseño y los componentes del escudo.

#### CONDICIONES DE DISEÑO DEL ESCUDO

I. Geología	a) Geología	Arcilla, Arena y Roca
	b) Tamaño máximo de roca	800 mm.
II. Alineación del Túnel	a) Longitud del túnel	6,370.801m.



b) Radio mínimo de curva	
i) Vertical	2500 m.
ii) Horizontal	250 m.
c) Gradiente máximo	20 %

### III. Dovelas

	Dovelas de concreto reforzado
a) Tipo	
b) Diámetro externo	9,910 mm.
c) Diámetro interno	9,110 mm.
d) Espesor	400 mm.
e) Largo	1,500 mm.
f) Número de dovelas por anillo	7 piezas+1K
g) Peso máximo por anillo	45,000 kg.

### COMPONENTES DEL ESCUDO

#### I. Cuerpo del escudo

a) Diámetro exterior del faldón	10,170 mm.
b) Diámetro interior del faldón	9,990 mm.
c) Espesor del faldón	90 mm.
d) holgura del Faldón	40 mm.
e) Longitud total	11,383 mm.
f) Sello del faldón	
i) Tipo	Tipo cepillo de alambre
ii) Filas	3

#### II. Empuje

a) Número de cilindros de empuje	28
b) Empuje unitario	3,000 kN
c) Empuje total	84,000 kN
d) Extensión máxima de cilindros	2,300 mm
e) Velocidad nominal de extensión	53 mm/min
f) Velocidad máxima de extensión	100 mm/min

### III. Articulación

a) Tipo	Plana activa
b) Radio de curvatura mínimo	250 m.
c) Giro	
i) Horizontal	2°
ii) Vertical	0.5°
d) Empuje total	20,300 kN

### IV. Cabeza cortadora

a) Tipo	Spoke
b) Diámetro de excavación	10,200 mm

### V. Especificaciones de la cabeza cortadora

a) Tipo de energía	Eléctrica
b) Potencia de la cabeza cortadora	2,280 kW
c) Velocidad máxima	2 rpm
d) Fuerza de torsión máxima	20,300 kNm

### VI. Tornillo sinfín No. 1

a) Tipo	Sin eje
b) Tipo de manejo	Hidráulico
c) Diámetro interno de la cubierta	1,200 mm
d) Tamaño máximo de piedra	800 mm
e) Velocidad máxima	5 rpm
f) Fuerza de torsión máxima	300 kNm
g) Capacidad	338 m <sup>3</sup> /h ( $\eta=100\%$ )
h) Compuerta	1, accionada hidráulicamente

### VII. Tornillo sinfín No.2

a) Tipo	
i) Parte frontal	Sin eje
ii) Parte trasera	Con eje
b) Tipo de manejo	Hidráulico
c) Diámetro interno de la cubierta	1,200 mm
d) Tamaño máximo de piedra	
i) Parte frontal	800 mm
ii) Parte trasera	400 mm
e) Velocidad máxima	6 rpm

f) Fuerza de torsión máxima	300 kNm
g) Capacidad	338 m <sup>3</sup> /h ( $\eta=100\%$ )
h) Compuerta	1, accionada hidráulicamente

#### VIII. Bomba de rezaga

a) Tipo	Bomba pistón
b) Capacidad	180 m <sup>3</sup> /h
c) Cantidad	2

#### IX. Erector de dovelas

a) Velocidad máxima	2 rpm
b) Ángulo de giro	$\pm 220^\circ$
c) Movimiento radial	1,065 mm
d) Movimiento axial	850 mm
e) Grados de Libertad	6
f) Mecanismo de sujeción	Vacio

#### X. Puertos de inyección

a) Cabeza cortadora	6 puertos de $\phi 40\text{mm}$ .
b) Mamparo	20 puertos de $\phi 50\text{mm}$ .
c) Cuerpo del escudo	12 puertos de $\phi 50\text{mm}$ .
d) Tornillo sinfín	7 puertos de $\phi 50\text{mm}$ .

### *SISTEMA BACKUP*

#### I. Carros

a) Tipo	Forma de portal
b) Cantidad	6 carros
c) Longitud total	90 metros

## II. Sistema de Inyección

		Inyección simultanea a través del faldón
a) Tipo		
b) Mortero		
i) Tanque agitador		
Capacidad		15 m <sup>3</sup>
Cantidad		1
ii) Bomba		
Gasto		200 l/min
Cantidad		2
c) Acelerante		
i) Tanque		
Capacidad		1.5 m <sup>3</sup>
Cantidad		1
ii) Bomba		
Gasto		20 l/min.
Cantidad		2

## III. Sistema de Espuma<sup>1</sup>

a) Agente		
i) Tanque		
Capacidad		2 m <sup>3</sup> .
Cantidad		1
b) Solución		
i) Tanque agitador		
Capacidad		8 m <sup>3</sup>
Cantidad		1
ii) Bomba		
Gasto		30 l/min
Cantidad		6

## IV. Sistema de agua industrial

a) Tanque		
i) Capacidad		15 m <sup>3</sup>
ii) Cantidad		1

---

<sup>1</sup> La espuma se inyecta cuando el material por excavar contiene boleos, con la finalidad de que la espuma actúe como aglomerante, garantizando así la trabajabilidad del material excavado. La espuma se inyectará a partir de la estación parque de los venados ya que se empezará a trabajar con boleos, actualmente solo se le inyecta agua al frente.

- b) Bomba
  - i) Gasto 200 l/min
  - ii) Cantidad 4

V. Sistema de aire comprimido

- a) Compresor
  - i) Gasto 8.2 m<sup>3</sup>/min
  - ii) Cantidad 2

VI. Ventilación por ventilador

- a) Flujo 600 m<sup>3</sup>/min
  - b) Diámetro del ducto 800 mm.
-