



# Webinar Túneles con TBM

## Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería



CTES

COMITÉ DE TÚNELES Y  
ESPACIOS SUBTERRÁNEOS  
DE CHILE

01 de Julio

“Condicionantes del terreno para  
elegir una tunelera apropiada”

Benjamín Celada Tamames  
Presidente  
Geocontrol, S.A.

---

# ÍNDICE

1. Introducción
2. Evaluación de la excavabilidad del terreno
3. Obtención de los datos para calcular el RME
  - 3.1. Sondajes necesarios en túneles superficiales bajo zonas edificadas
  - 3.2. Sondajes necesarios en túneles profundos
4. Incidencia del terreno en la elección de la tunelera apropiada
  - 4.1. Tunneleras para excavar frentes estables
  - 4.2. Tunneleras para excavar frentes inestables
  - 4.3. Tunneleras para excavar frentes estables e inestables
5. Conclusiones
6. Bibliografía

## 1.- Introducción (1)

En la construcción de cualquier obra subterránea **el condicionante que tiene mayor peso es el comportamiento del terreno a excavar**; ya que si éste no presenta problemas de ESTABILIDAD las obras subterráneas se pueden construir con rendimientos elevados.

Por el contrario, cuando se presentan inestabilidades en la frente los rendimientos suelen caer drásticamente e incluso la tunelera llega a no poder avanzar, por **ATRAPAMIENTO DE LA CABEZA EN LA FRENTE DE EXCAVACIÓN**.

## 1.- Introducción (2)

En el caso de utilizar una tuneladora la incidencia del comportamiento del terreno sobre los rendimientos es mucho mayor, que si la construcción se realiza con el MÉTODO SECUENCIAL (antes NATM).

Ello es debido a que una tunelera es un sistema muy rígido; de tal forma que cualquier intervención en la frente de avance o en la propia tunelera exige paradas de varias semanas.

Para analizar la manera en que puede influir un terreno en la elección de una tunelera, vamos a considerar tres aspectos:

- 1.- Evaluación de la excavabilidad del terreno.
- 2.- Adquisición de datos para calcular la excavabilidad.
- 3.- Alternativas para seleccionar una tunelera apropiada.

## 2.- Evaluación de excavabilidad del terreno (1)

En el caso de los terrenos tipo suelo, actualmente, no existe ningún método para valorar su excavabilidad; pero para los terrenos rocosos Geocontrol, en colaboración con el Profesor Bieniawski, ha desarrollado el Índice Rock Mass Excavability (RME).

El RME tiene una estructura similar a la del RMR y en su valoración se incluye un parámetro específico relacionado con la perforabilidad: el Drilling Rate Index (DRI) y también el tiempo de estabilidad.

PARÁMETROS A CONSIDERAR	VALORACIONES	
	RMR	RME
Resistencia a la compresión simple de la roca intacta	0 - 15	0 - 25
Número de juntas por metro en la frente	0 - 40	0 - 30
Estado de las discontinuidades	0 - 30	-
Caudal de agua infiltrada	0 - 15	0 - 5
<b>Drilling Rate Index</b>	-	0 - 15
<b>Tiempo de autoestabilidad del frente</b>	-	0 - 25
Valoración máxima	100	100

## 2.- Evaluación de excavabilidad del terreno (2)

En base al RME la excavabilidad de los terrenos rocosos se clasifica en cuatro clases:

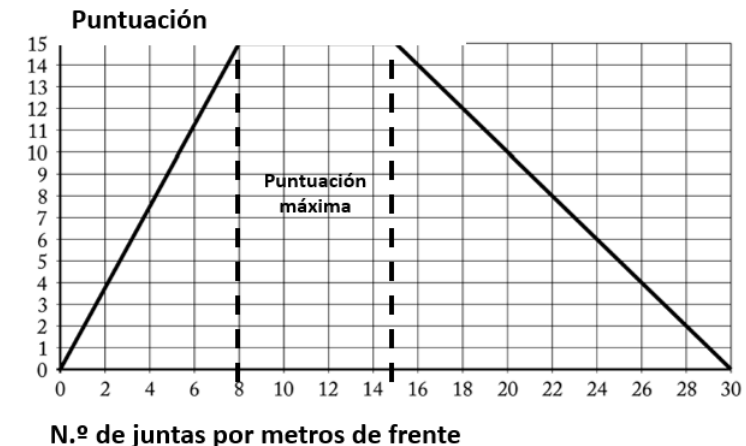
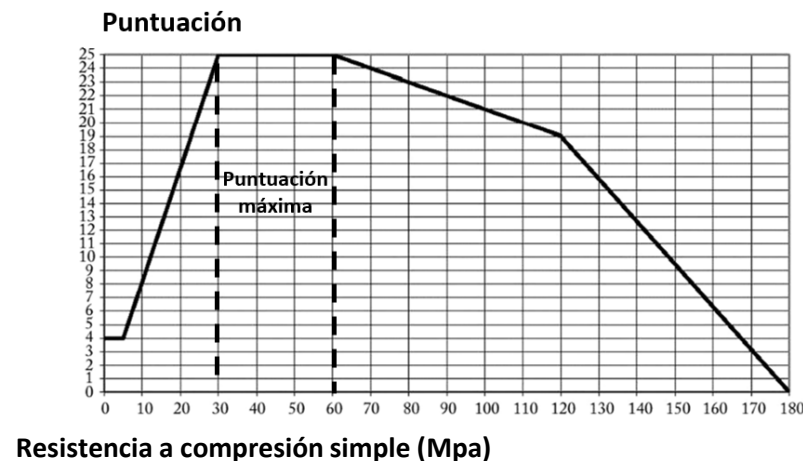
CLASE	Valoración del RME	Excavabilidad
I	80 – 100	Excelente
II	60 – 79	Muy buena
III	40 – 59	Buena
IV	< 40	Mala

Para la correcta utilización del RME hay que tener presente que:

- El RME y El RMR son dos índices de calidad diferentes; pues el RME está relacionado con la excavabilidad del terreno mientras que el RMR lo está con su comportamiento tenso deformacional. El RME no puede relacionarse con el RMR.

## 2.- Evaluación de excavabilidad del terreno (3)

Los valores más elevados del RME se obtienen para una resistencia a compresión simple comprendida ente 30 y 60 Mpa y para un número de juntas en la frente de excavación comprendido entre 8 y 15 juntas/m.



De lo anterior se deduce que LOS MEJORES RENDIMIENTOS CON UNA TUNELERA SE OBTENDRÁN EXCAVANDO ROCAS DE RESISTENCIA MEDIA A BAJA Y CON UN GRADO DE FRACTURACIÓN MEDIO.



### 3.- Obtención de los datos para calcular el RME (1)

El RME hay que asociarlo a un litotipo determinado y para obtener los datos que permitan calcularlo hay que perforar sondajes de reconocimiento.

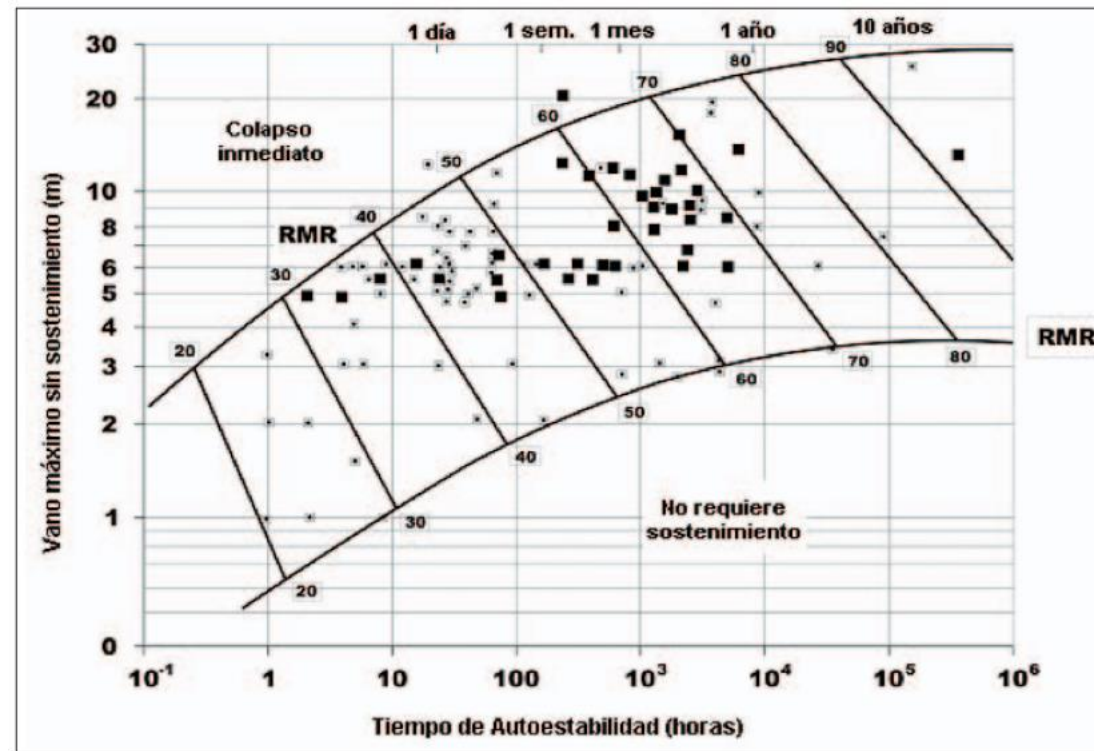
Para que esta tarea sea eficaz es **imprescindible que antes de plantear una campaña de sondajes se disponga del modelo geológico del terreno en el que se construirá el túnel.** Este modelo geológico previo se debe obtener a partir de los trabajos de cartografía y geofísica.

Testificando los sondajes perforados se puede conocer el número de juntas por metro en la zona de interés y obtener las muestras necesarias para hacer los ensayos de laboratorio que permitan conocer los valores de los siguientes parámetros:

- Resistencia a compresión simple de la roca intacta.
- Drilling Rate Index, desarrollado por la Universidad Trondheim (Noruega).

### 3.- Obtención de los datos para calcular el RME (2)

El tiempo de autoestabilidad de la frente se puede evaluar, mediante el ábaco propuesto por el Profesor Bieniawski, a partir del RMR y de la longitud del tramo sin sostenimiento en el túnel.



### **3.1- Sondajes necesarios en proyectos de túneles superficiales bajo zonas habitadas (1)**

En los túneles superficiales, en los cuales la solera del túnel suele estar a unos 25-40 m bajo la superficie, no suele haber problemas para perforar sondajes que lleguen a la cota de la solera.

En estos casos se admite como criterio general, para túneles urbanos, que **la distancia media entre sondajes esté comprendida entre 50 y 100 m**; según la heterogeneidad del terreno.

Este criterio debe cumplirse antes del inicio de la excavación; aunque es normal que el número de sondajes vaya aumentando hasta que se inicie la construcción.

## 3.1- Sondajes necesarios en proyectos de túneles superficiales bajo zonas habitadas (2)

Como ejemplo de aplicación del criterio anterior, se puede presentar el caso del túnel que forma parte del tren rápido MEXICO DF-TOLUCA constituido por dos tubos gemelos de 4,7 km de longitud; que ha presentado un grado de dificultad elevado.

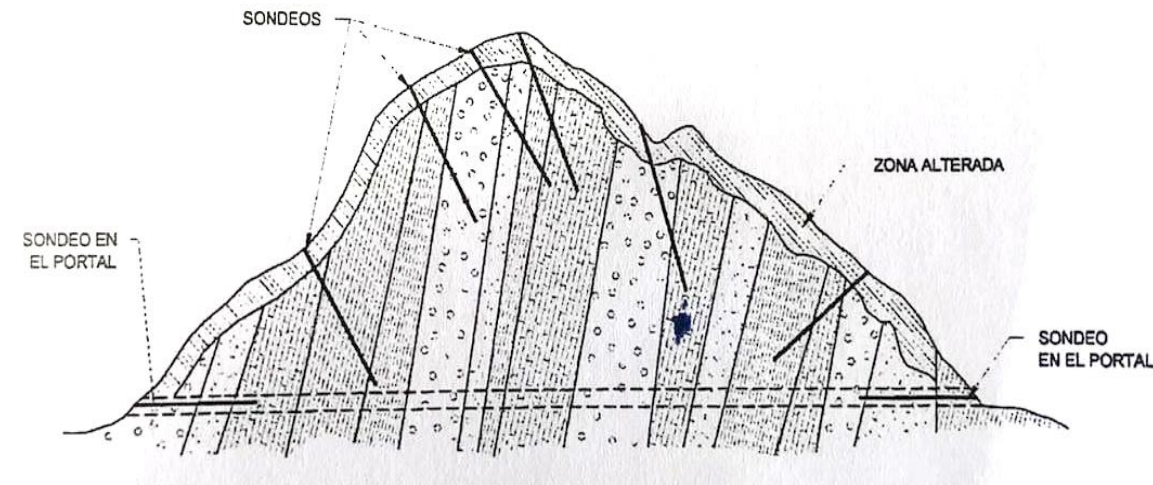
FASE DE DISEÑO	NÚMERO DE SONDAJES PERFORADOS			DISTANCIA MEDIA ENTRE SONDAJES (m)
	EN LA FASE	ACUMULADOS	PROPORCIÓN DEL TOTAL (%)	
Ingeniería Básica	24	24	21,8	198
Ingeniería de Detalle	14	38	12,7	125
Campaña complementaria de la Constructora	28	66	25,4	72
Campaña complementaria de la Inspección Técnica de la Obra	44	10	40,1	43

## 3.2- Sondajes necesarios en túneles profundos (1)

En los túneles con tapadas importantes, que superan los 1000 m en muchos lugares de los Andes, la perforación de los sondajes de reconocimiento plantea dos problemas importantes: uno la accesibilidad a los emplazamientos y otro el costo que supone realizar sondajes de más de 1000 m de longitud.

Para resolver este problema se debe potenciar la cartografía, la aplicación de las técnicas geofísicas y plantear una campaña muy elaborada de sondajes.

En coherencia con lo anterior, muchas veces es más útil una campaña bien orientada de sondajes cortos que otra basada en sondajes largos que no persigan un objetivo previamente establecido.



## 3.2- Sondajes necesarios en túneles profundos (2)

Otro aspecto relevante es establecer un criterio para conocer el costo que deben tener las campañas de reconocimiento, cuyo mayor componente es el costo de los sondeos.

Para los túneles cuya longitud está comprendida entre 0,5 km y 5,0 km, se puede aplicar la expresión presentada por CELADA (2016):

$$CC = \left(0,75 + \frac{L}{2}\right) \cdot \frac{CT}{100} \cdot DC \text{ donde}$$

CC = Costo de la campaña de reconocimiento, que debe incluir los trabajos realizados en todas las fases.

L = Longitud del túnel expresada en km.

CT = Costo de la Obra Civil del túnel.

DC = Dificultad constructiva del túnel: Dificultad normal DC=1  
Dificultad baja: DC=0,8  
Dificultad alta DC=1,4

## 3.2- Sondajes necesarios en túneles profundos (3)

Para un túnel de 0,5 km de longitud y dificultad constructiva normal, la expresión anterior indica  $CC = 0,01 \cdot CT$ .

Para un túnel de 5 km de longitud y dificultad constructiva normal, de la expresión anterior se obtiene:  $CC = 0,032 \cdot CT$ .

Si se mantiene la longitud en 5 km, pero la dificultad constructiva se considera elevada, se obtiene  $CC = 0,046 \cdot CT$ .

Cuando los túneles tienen una longitud claramente superior a los 5 km la campaña de sondajes debe estudiarse caso a caso y no es posible dar criterios generales sobre su costo.

## **4.- Incidencia del terreno sobre la elección de la tunelera apropiada (1)**

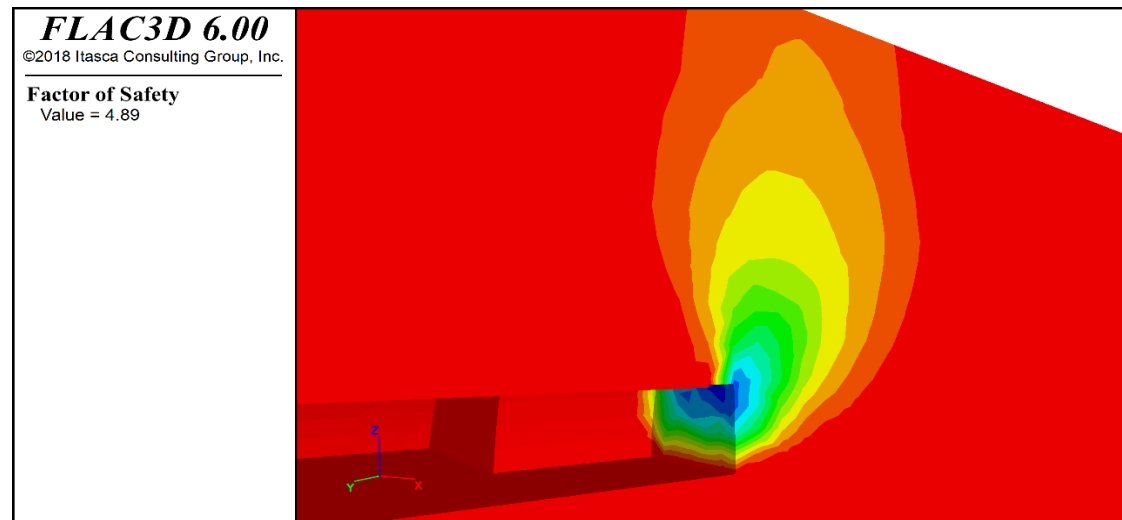
**Entre la frente de la excavación de un túnel en roca y la sección en la que se coloca el sostenimiento, ya sea convencional a base de pernos y hormigón proyectado o a base de anillos de dovelas, la estabilidad de la excavación depende únicamente del comportamiento del terreno.**

**Si en el tramo próximo a la frente en el que no hay sostenimiento, cuya longitud puede superar los diez metros, el terreno plastifica la excavación se llegará a derrumbar y se producirán atasques en la rueda de corte que llegarán a detener el avance de la tunelera.**



## 4.- Incidencia del terreno sobre la elección de la tunelera apropiada (2)

La mejor forma de evaluar la estabilidad del terreno excavado por una tunelera y no sostenido es resolviendo modelos geomecánicos 3D, como el que se presenta a continuación:



**Las frentes con  $FS < 1,2$  deben ser consideradas inestables y también las frentes de los túneles a construir en medios urbanos.**

## 4.- Incidencia del terreno sobre la elección de la tunelera apropiada (3)

Atendiendo a la estabilidad de los frentes de excavación, las tuneleras pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Tuneleras para excavar frentes estables

- TBM
- ESCUDOS

Tuneleras para excavar frentes inestables

- ESCUDOS EPB
- HIDROESCUDOS

Tuneleras para excavar frentes estables e inestables

- ESCUDOS DUALES
- ESCUDOS DE DENSIDAD VARIABLE

## 4.1- Tuneleras para excavar frentes estables (1)

Existen dos tipos básicos de tuneleras para excavar con frentes estables: las TMB y los ESCUDOS.

Las TBM están indicadas para excavar rocas duras y en ellas el sostenimiento se realiza mediante pernos y hormigón proyectado.

En estas tuneleras el sostenimiento se puede empezar a colocar a unos 5 m de la frente.



TBM abiertas

## 4.1- Tuneleras para excavar frentes estables (2)

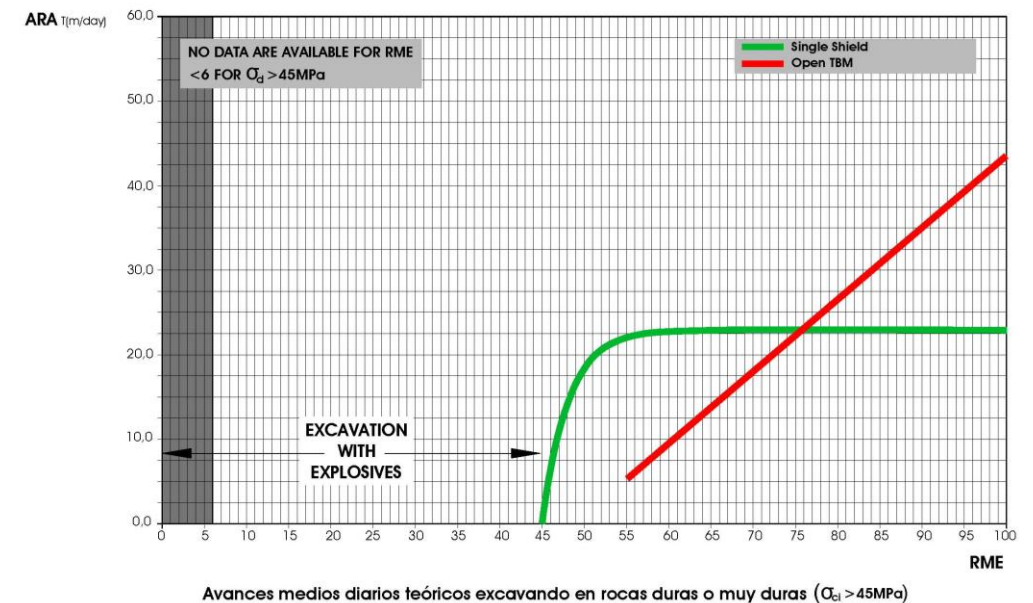
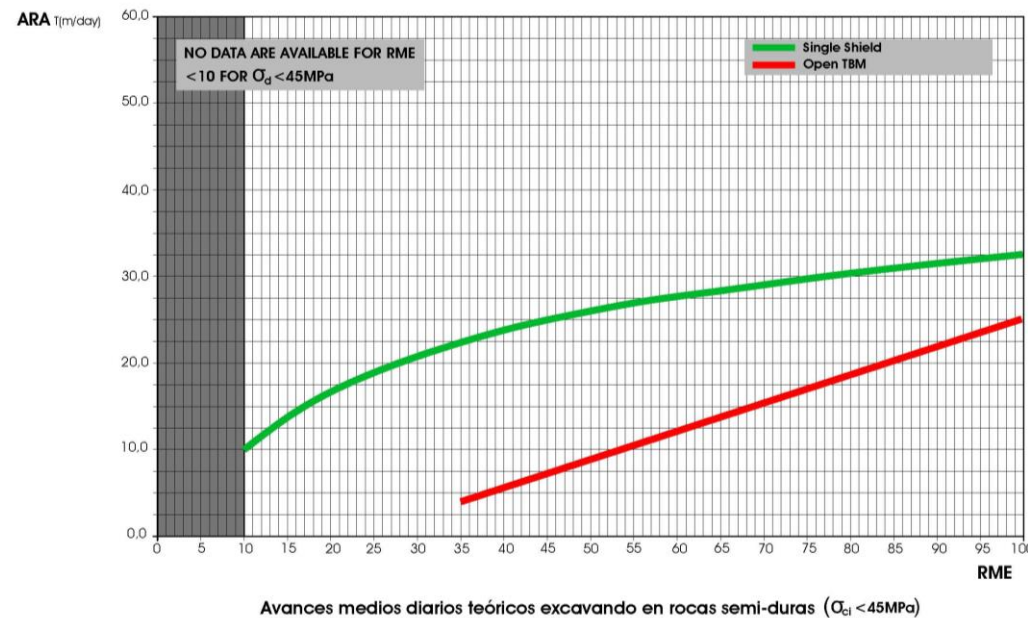
Los ESCUDOS se diferencia de las TBMs en que la tunelera está rodeada de un cilindro de acero, en cuyo interior se alojan los motores de corte, un erector de dovelas para montar los anillos de hormigón armado y los cilindros de propulsión: de la tuneladora.

En estas tuneleras los anillos de dovelas entran en contacto con el terreno a uno 10 – 12 m de la frente, dependiendo del diámetro del túnel.



## 4.1- Tuneleras para excavar frentes estables (3)

La elección entre una TBM y un ESCUDO puede hacerse utilizando los gráficos siguientes:



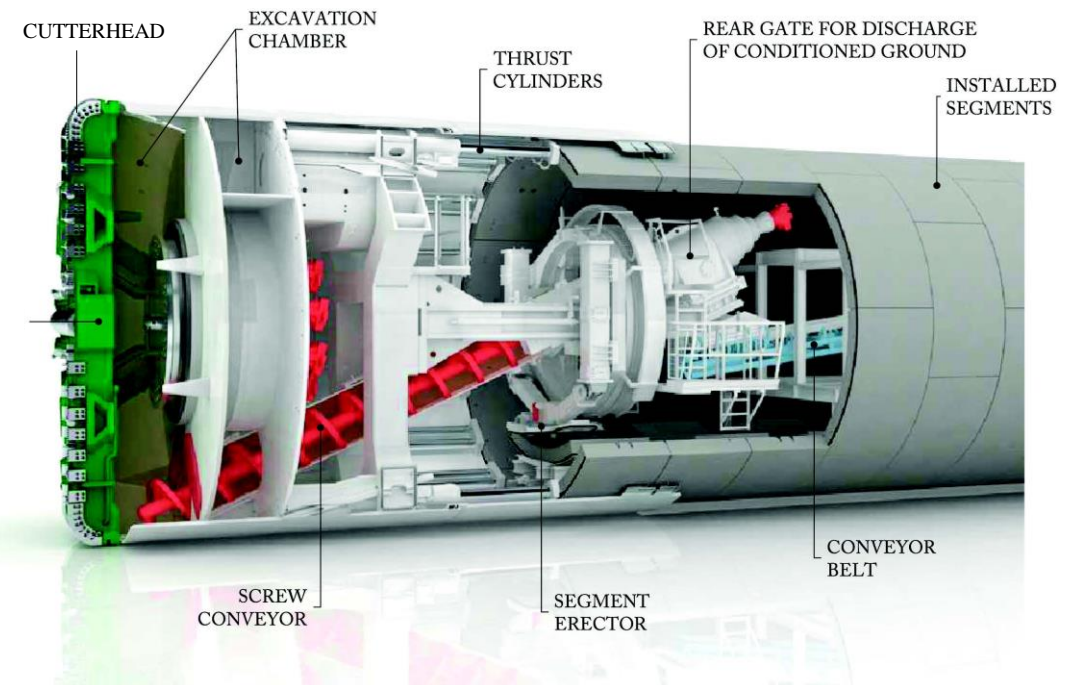
En terrenos con rocas semiduras ( $\sigma_{ci} < 45 \text{Pa}$ ) los ESCUDOS siempre son más ventajosos que las TBMs; pero en rocas duras a muy duras, si el RME es inferior a 75 puntos los ESCUDOS son más ventajosos; pero si el  $\text{RME} > 75$  es mejor utilizar una TBM.

## 4.2- Tuneleras para excavar frentes inestables (1)

Cuando la frente de un túnel es inestable es preciso aplicar una presión para estabilizarlo e para impedir que se derrumbe y atrape a la tunelera.

Las tuneleras que permiten aplicar una presión sobre el frente son los Escudos EPB y los Hidroescudos.

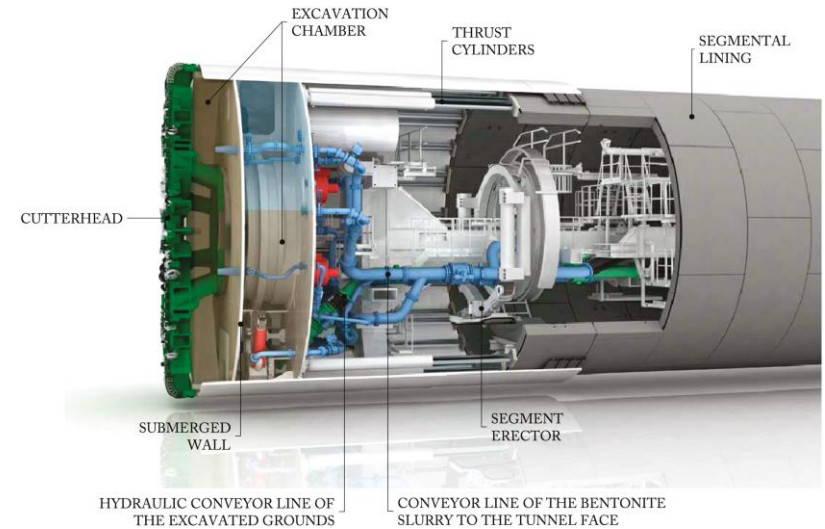
En los ESCUDOS EPB la presión contra la frente se logra empujando los propios terrenos excavados. **Para mantener en presión la cámara de excavación ésta está cerrada y la marina sale del escudo a través de un tornillo helicoidal.**



## 4.2- Tuneleras para excavar frentes inestables (2)

Los **HIDROESCUDOS** aplican una presión contra el frente mezclando la marina con agua y manteniéndola a presión por medio de bombas hidráulicas.

En estas tuneladoras la **marina se transporta al exterior del túnel hidráulicamente, a través de tuberías, y en el exterior es preciso disponer de una planta de cribado para separar la marina del agua.**

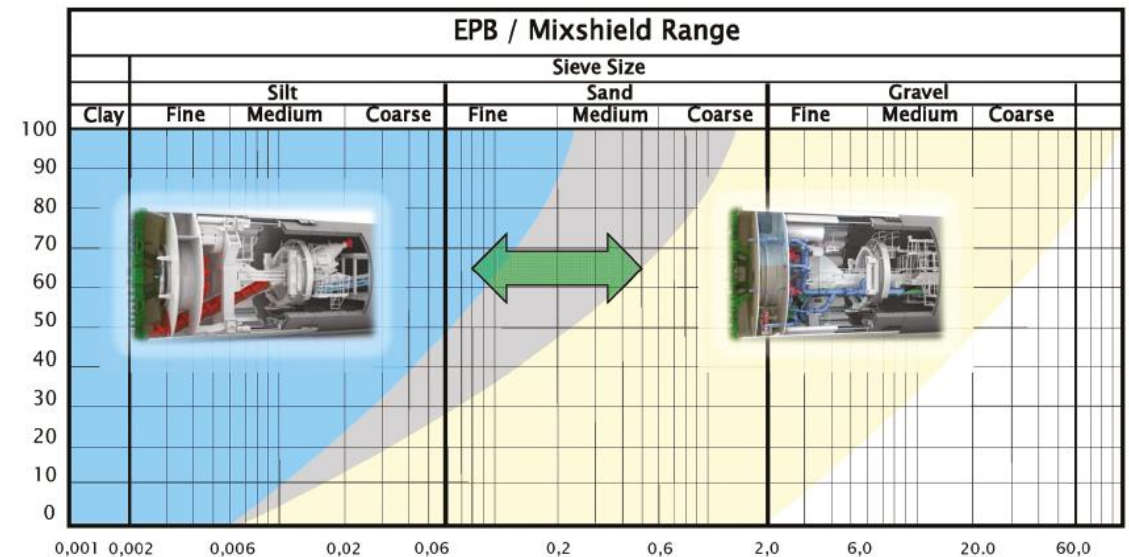


## 4.2- Tuneleras para excavar frentes inestables (3)

La elección entre un ESCUDO EPB y un HIDROESCUDO se hace en base a la granulometría del terrenos excavar.

Los terrenos de granulometría cohesiva, **limos y arcillas**, son los más apropiados para **utilizar ESCUDOS EPB**; como es el caso del Tramo 1 de la L-7 del Metro de Santiago.

En los tramos de granulometría friccionante, **arenas gruesas y gravas**, **deben utilizarse hidroescudos**.





## 4.3- Tuneleras para construir túneles con frentes estables e inestables

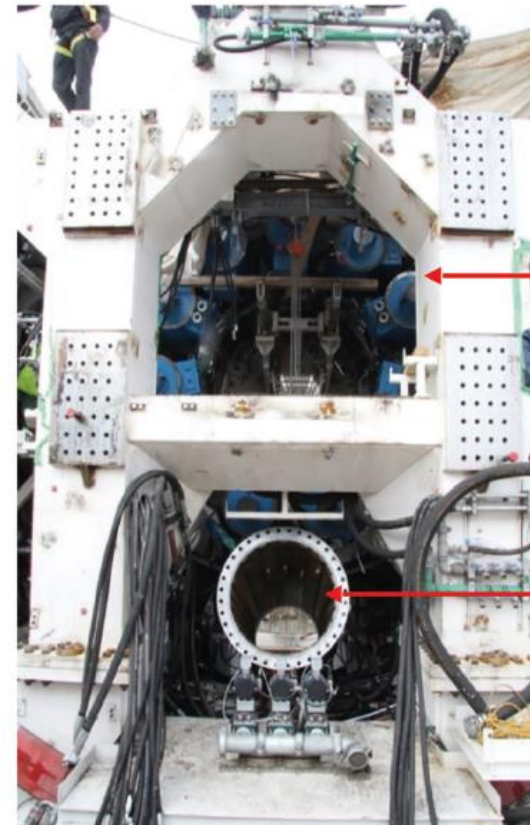
Los túneles que presentan alternancias de frentes estables e inestables, que son bastante frecuentes, suponen un reto importante para construirlos con tuneleras y deben ser construidos con tuneleras multimodales: ESCUDOS DUALES y ESCUDOS EPB con densidad variable; los primeros orientados a excavar en rocas y los segundos en suelos.

Hay que tener presente que no existe, y probablemente no existirá, una tuneladora universal que sea capaz de construir túneles en los que coexistan frentes estables con otros inestables, con rendimientos similares a los túneles sin frentes mixtos.

Actualmente, **en los túneles con frentes mixtos las tuneleras existentes en el mercado difícilmente proporcionan rendimientos medios que superen los 300 m/mes.**

## 4.3.1.- Escudos Duales

Los ESCUDOS DUALES están equipados con **dos sistemas para la extracción de la marina**: un tornillo helicoidal que permite un funcionamiento en modo EPB y una correa transportadora para poder trabajar en abierto, sin aplicar presión en la frente.



Alojamiento de la  
cinta transportadora

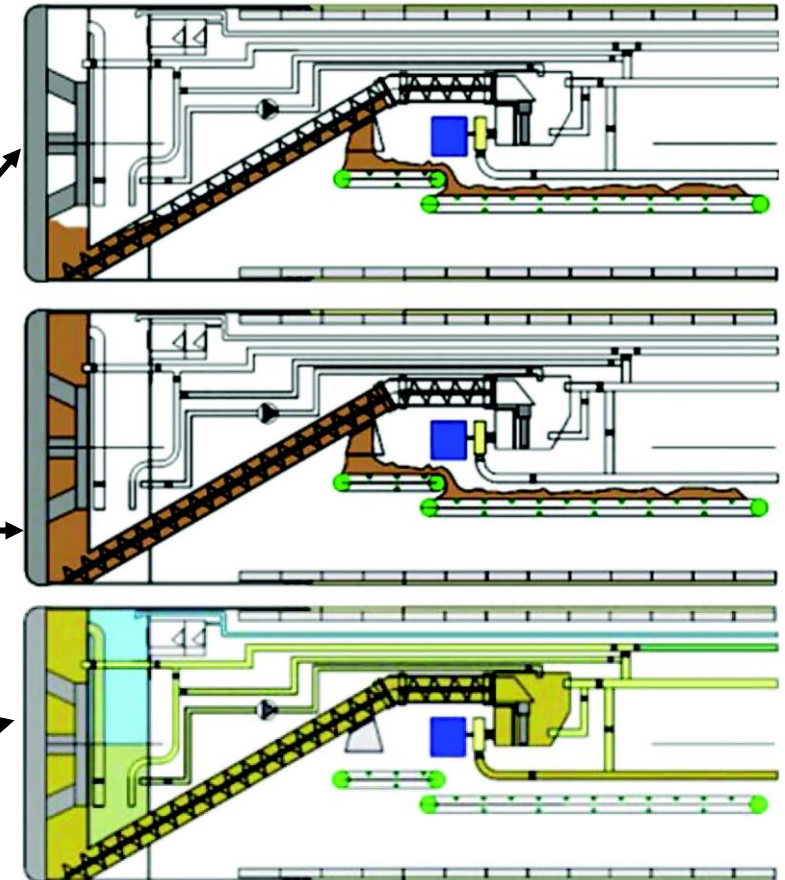
Alojamiento del  
tornillo sin fin.

Escudo Dual utilizado en los Túneles de Toluca, México.

## 4.3.2- Escudos con densidad variable en la marina extraída

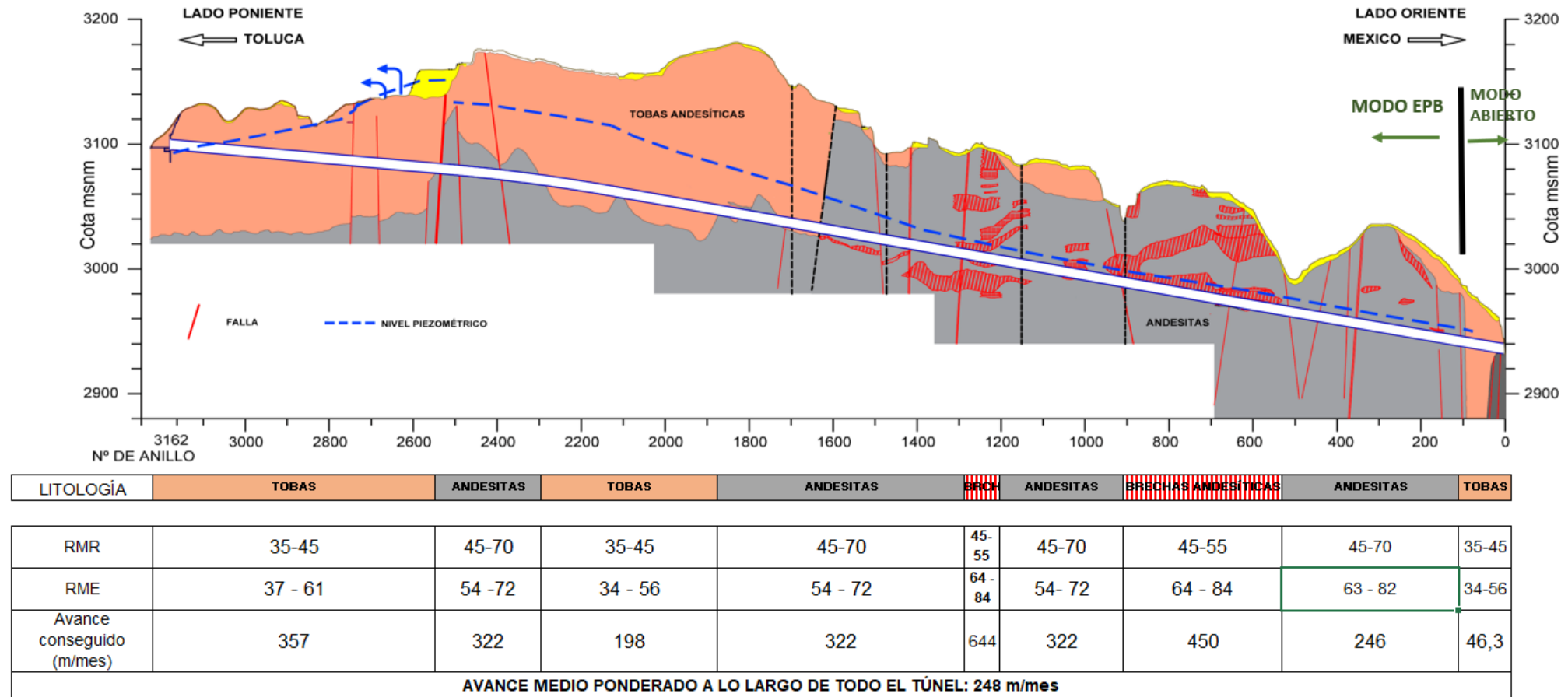
La tecnología de ESCUDOS CON DENSIDAD VARIABLE EN LA MARINA EXTRAÍDA, desarrollada por HERRENKNECHT, permite tres modos de funcionamiento:

- **Escudo abierto**, la marina se extrae mediante el **tornillo helicoidal que nunca está lleno**. La frente debe ser estable.
- **Escudo EPB**, la marina se extrae mediante el **tornillo helicoidal a presión**. El terreno debe ser arcilloso o limoso y la frente inestable.
- **Hidroescudo**, la marina se extrae mediante el **tornillo helicoidal a presión combinado con un sistema hidráulico en serie**. El terreno debe ser arenas o gravas y la frente inestable.



## 5.- Conclusiones (1)

Para aclarar lo expuesto anteriormente, a continuación se muestra el perfil de los Túneles de Toluca con los datos más relevantes referentes a su construcción.



## 5.- Conclusiones (2)

En los Túneles de Toluca el 40,1% de los sondajes realizados fueron perforados inmediatamente antes del inicio de las obras; por lo cual la información que proporcionaron no se pudo tener en cuenta para definir la tuneladora.

El 96% de la longitud de estos túneles fue excavada en modo EPB; lo cual cuestiona que un ESCUDO DUAL fuera la tuneladora adecuada.

**Los mejores avances mensuales se han obtenido en las Brechas andesíticas, con  $64 < RME < 84$  que no son los terrenos de mejor comportamiento tenso deformacional; pues en ellos se tiene  $45 < RMR < 55$ .**

Los valores del RME tienen una relación directa con los rendimientos obtenidos.

El rendimiento medio ponderado de 248 metros/mes es acorde a la dificultad constructiva del túnel.

## 5.- Conclusiones (3)

Como conclusión final, es preciso resaltar que **PARA TENER ÉXITO EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL CON UNA TUNELERA ES PRECISO DEFINIR LA TUNELERA EN BASE A UN MODELO GEOLÓGICO SUSTENTADO POR SONDAJES.**

Definir una tunelera sin disponer de un modelo geológico sustentado por sondajes es lo más parecido que hay a jugar a la lotería; si tenemos mucha suerte ganaremos el premio mayor, pero lo normal será que perdamos el dinero invertido.

## 5.- Bibliografía

- Bieniawski, R.; Celada, B.; Tardáguila, I.  
Selección de tuneladoras para macizos rocosos con frentes estables.  
Ingeopress. Nº 181. Madrid, mayo 2009.
- Castellanos, V.; Celada, B.; Tardáguila, I.  
Control del funcionamiento de las tuneladoras EPB de los túneles de Toluca mediante el sistema ae-MAT EPB.  
Ingeopres. Nº 271, Madrid, noviembre 2018.
- Celada, B.  
Criterios sobre el costo de las campañas de reconocimiento para el diseño de túneles.  
4º Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en suelos y roca.  
Ciudad de México, 26-27 de mayo 2016
- Celada, B.; Bieniawski, Z.T.  
Ground characterization and structural analyses for tunnel design.  
CR Press, London – New York, 2020



**CTES**

COMITÉ DE TÚNELES Y  
ESPACIOS SUBTERRÁNEOS  
DE CHILE

**EXPOSITOR**

**Benjamín Celada Tamames**

Presidente

[Bcelada@Geocontrol.es](mailto:Bcelada@Geocontrol.es)