



“Criterios para la selección de  
una TBM. El caso del túnel de  
Gudauri, Georgia. Aplicación a  
túneles andinos”

José Miguel Galera  
Director general  
SUBTERRA Ingeniería

## Contenido

- 1.- ¿Qué tipos de TBM existen en el mercado?
- 2.- ¿Cómo escoger una TBM de roca?
- 3.- ¿Qué TBM proporcionará el mejor rendimiento de excavación?
- 4.- El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)
- 5.- El uso de las TBM en túneles en los Andes
- 6.- Conclusiones

## ¿Qué tipos de TBM existen en el mercado?

### 1. ¿Qué tipos de TBM existen en el mercado?

La tecnología actual ofrece cinco tipos básicos de TBMs:

- ✓ TBMs de “roca”:
    - ✓ TBM abierta (topo, gripper TBM o “main beam”)
    - ✓ Escudo simple (o TBM escudada)
    - ✓ Doble escudo universal (DSU)
  - ✓ TBMs de “suelo”:
    - ✓ EPB (Earth Pressure Balance)
    - ✓ SLURRY o Hidro-escudo TBM
- } “Escudos presurizados”

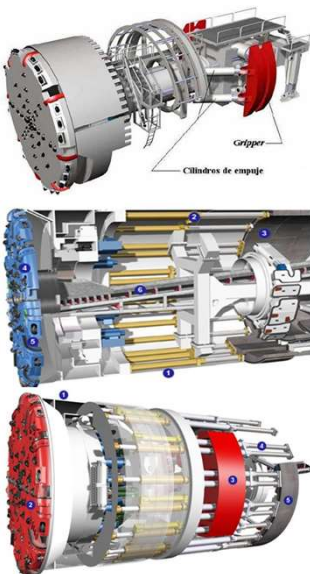


Alcanda y Fernández (2016)

Tipo TBM	Lugar	Diámetro (m)
TBM abierta	PH Sir Adam Beck (Canadá)	14,40
Doble Escudo	Brisbane (Australia)	12,45
EPB	Alaskan-Way (EEUU)	17,48
Hidroescudo	Tuen Mun - Chek Lap Kok (China)	17,60

- ✓ Las TBMs de “suelo” permiten presurizar la frente de excavación
- ✓ Cada vez son más frecuentes las TBM híbridas o tip “crossover” que permiten trabajar de modo dual
- ✓ A día de hoy la tecnología permite TBMs de roca de hasta 14,5 m y TBMs de suelo de hasta 17,5 m

### 1. ¿Qué tipos de TBM existen en el mercado?



- ✓ Las TBMs de “roca” poseen **tres características comunes**:
  - ✓ La **cabeza de corte** está equipada con discos cortadores, que describen círculos concéntricos, liberando “chips” entre trayectorias
  - ✓ La **extracción primaria** de maraña es a través de cangilones que vierten sobre una cinta o faja transportadora
  - ✓ La **frente de excavación** está **abierto**, sin presurizar; lo que implica disponer de un mínimo tiempo de autoestabilidad
- ✓ Pero **difieren en los dos aspectos** fundamentales:
  - ✓ El **soporte**, ya que en una TBM abierta está constituido por pernos, marcos y shotcrete; mientras que en las otras dos, es un anillo de dovelas prefabricadas
  - ✓ El **apoyo o reacción necesaria para el avance de la TBM**, que puede efectuarse mediante **grippers** o zapatillas radiales (TBM abierta), o mediante **gatos** que se apoyan sobre el último anillo de dovelas instalado (DSU y Escudo simple)



TBM abierta, Alto Maipo



Escudo simple, Pajares



Doble Escudo, Los Cóncores

## ¿Cómo escoger una TBM de roca?

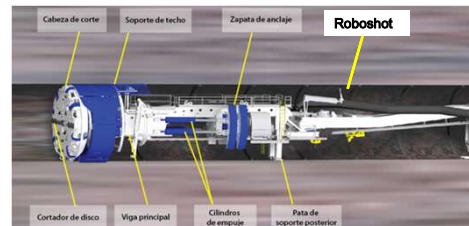
Webinar Túneles con TBM - Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería

www.ctes.cl

### 2. ¿Cómo escoger una TBM de roca?

En una TBM abierta:

- ✓ El apoyo es contra el terreno (grippers)
- ✓ Los pernos, malla y marcos; se instalan a pocos metros de la frente (L1 detrás de la cabeza de corte)
- ✓ El shotcrete se proyecta a más de una decena de metros (L2)



L2: roboshot

Grippers

L1: pernos y marcos Cabeza de corte

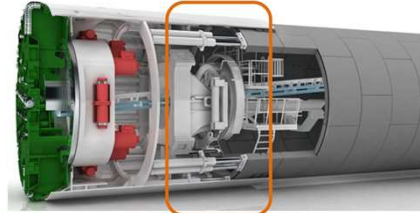
Webinar Túneles con TBM - Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería

www.ctes.cl

## 2. ¿Cómo escoger una TBM de roca?

En una TBM escudada:

- ✓ El apoyo es contra el anillo de dovelas
- ✓ El soporte es mediante dovelas prefabricadas
- ✓ Los DSU permiten simultanear este esquema con el de una TBM abierta, al disponer de dos escudos (delantero y trasero) separados por un telescópico



Escudo simple. Mecanismo de reacción (Fuente herrenknecht.com)



Doble Escudo

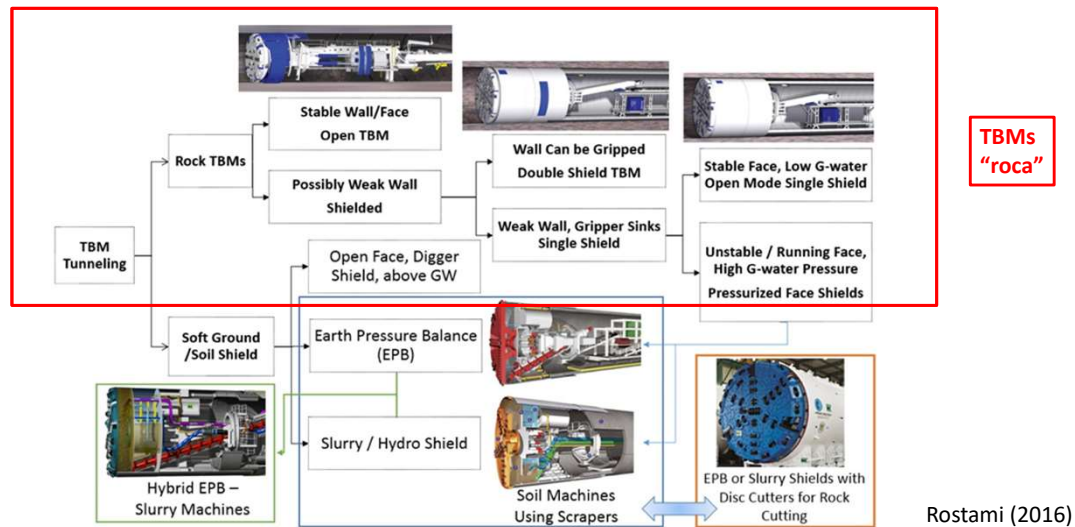


## 2. ¿Cómo escoger una TBM de roca?

Los parámetros a evaluar para escoger adecuadamente una TBM de roca son:

- ✓ **Perforabilidad de la roca**, que condiciona el diseño de la cabeza de corte:
  - ✓ **Resistencia a la compresión** simple de la roca
  - ✓ **Fragilidad** (y tenacidad)
  - ✓ **Dureza**
  - ✓ **Abrasividad** (capacidad de desgaste)
  
- ✓ **Características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso**, en especial en relación a su fracturamiento: espaciado, orientación y estado de las estructuras, al objeto de evaluar:
  - ✓ **Estabilidad de la frente de excavación**
  - ✓ **Tiempo de autoestabilidad**
  - ✓ **Competencia de las paredes** sobre las que apoyarse
  - ✓ **Esfuerzos naturales**, para evaluar condiciones extremas tales como squeezing (atrapamiento de la TBM) o rock bursts

## 2. ¿Cómo escoger una TBM de roca?



## 2. ¿Cómo escoger una TBM de roca?

Puede concluirse que:

- ✓ Una **TBM abierta** debe emplearse en macizos rocosos competentes, pero es una máquina que **resulta más vulnerable a sobreexcavaciones y estallidos de roca**
- ✓ Un **escudo simple** debe emplearse cuando no se tiene garantías acerca del tiempo de autoestabilidad del terreno, ni de que el macizo rocoso permita apoyar a los grippers, **es la TBM de menor riesgo**, y su velocidad está limitada a la instalación de los anillos de dovelas
- ✓ Un **doble escudo** es una **máquina más polivalente** que puede trabajar como un escudo simple, más largo; o en modo optimizado, permite simultanear la excavación con la colocación del anillo de dovelas, pero al ser más larga, es más **vulnerable frente al atrapamiento**

## ¿Qué TBM proporcionará el mejor rendimiento de excavación?

### 3. ¿Qué TBM proporcionará el mejor rendimiento de excavación?

De un modo genérico, el **AR** o ARA (Ratio de Avance) expresado en m/día se puede calcular como un producto:

$$AR = ROP \cdot U \cdot Ns \cdot Sh$$

donde: **ROP (Ratio de penetración)**, también referido en la bibliografía como PR, que se expresa en m/h  
**U (Ratio de Uso)**, que expresa la relación entre el tiempo de perforación y el tiempo total  
**Ns** el número de relevos por día y **Sh** el número de horas por relevo

- ✓ Para la estimación del ROP existen desde el inicio de los 90 varios estudios, destacando los efectuados en Colorado, modelo CSM (Ozdemir y Nilsen, 1993, y Yagiz, *et al.* 2012) y en Trondheim, modelo NTNU (Bruland, 1998)
- ✓ Estos métodos permiten valorar el ROP con bastante fiabilidad, sin embargo **es el parámetro AR el que permite valorar cuál es la TBM que a priori, proporcionará un mejor rendimiento**
- ✓ Para valorar el AR existen dos grandes metodologías, según estén o no basadas en la estimación inicial del ROP
- ✓ Entre las primeras destaca el QTBM (Barton, 2000), mientras que entre las segundas destaca el RME (Bieniawski *et al.*, 2007). Sin embargo, el QTBM arroja mayor dispersión en las estimaciones (Palstrom y Broch, 2006)
- ✓ Posiblemente esta mayor dispersión tenga dos causas. Una, que el QTBM parte de una clasificación geomecánica para estimar el soporte, que es diferente a perforarlo. Pero, además el paso del ROP al AR, no es sencillo

### 3. ¿Qué TBM proporcionará el mejor rendimiento de excavación?

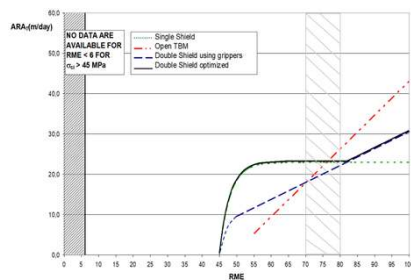
- ✓ El RME fue creado exclusivamente para cuantificar la dificultad que presenta un macizo rocoso a ser perforado con una TBM
- ✓ Par ello se analizaron, inicialmente, 387 secciones homogéneas de túnel excavado con los tres tipos de TBM de roca.
- ✓ La última versión del RME, corresponde a la presentada en los congresos WTC 2008 y 2009
- ✓ El análisis de estos casos demostró que los parámetros con mayor influencia en el ARA son:
  - ✓ **Perforabilidad** expresado a través del DRI (Bruland, 1988, 2000)
  - ✓ **Homogeneidad de la frente de excavación** y características de las discontinuidades
  - ✓ **Tiempo de autoestabilidad** de la excavación
- ✓ Basado en experiencias previas con TBMs se añadieron dos parámetros básicos:
  - ✓ **Resistencia a la compresión simple** de la roca intacta
  - ✓ **Presencia de agua** en la frente

#### El Rock Mass Excavability Index (RME)

Uniaxial compressive strength of intact rock [0-25 points]										
$\sigma_c$ (MPa)	<5	5-30	30-90	90-180	>180					
Rating	4	14	25	14	0					
Drillability [0-15 points]										
DRI	<80	80-85	65-50	50-40	<40					
Rating	15	10	7	3	0					
Discontinuities in front of the tunnel face [0-30 points]										
Homogeneity	Number of joints per meter					Orientation with respect to tunnel axis				
	Homogeneous	Mixed	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	Perpendicular	Oblique	Parallel
Rating	10	0	2	7	15	10	0	5	3	0
Stand up time [0-25 points]										
Hours	<5	5-24	24-96	96-192	>192					
Rating	0	2	10	15	25					
Groundwater inflow [0-5points]										
Liter/sec	>100	70-100	30-70	10-30	<10					
Rating	0	1	2	4	5					

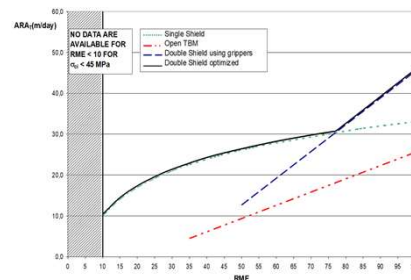
### 3. ¿Qué TBM proporcionará el mejor rendimiento de excavación?

#### Conclusiones de la aplicación del RME para macizos rocosos con $\sigma_{ci} > 45$ MPa



- ✓ Para RME>80, las TBM abiertas son las que proporcionan un mejor rendimiento
- ✓ Para RME entre 70 y 80, todas las TBMs proporcionan rendimientos similares en el entorno de 20 m/día
- ✓ Para RME entre 45 y 70, los escudos simples y los dobles escudos, son las mejores opciones

#### Conclusiones de la aplicación del RME para macizos rocosos con $\sigma_{ci} < 45$ MPa



- ✓ En general el tipo de TBM más iniciado en estos casos será un Doble-Escudo, independientemente del valor del RME.
- ✓ Para RME inferiores a 75 puntos, la mejor opción es el uso de un Escudo simple, que es una TBM de menor precio que el DSU.
- ✓ El empleo de TBM en este tipo de macizos rocosos ha de hacerse con precaución.

**Para RME<45 no se recomienda el empleo de una TBM**



### 3. ¿Qué TBM proporcionará el mejor rendimiento de excavación?

#### Criterios generales para seleccionar una TBM de roca

- ✓ Para seleccionar uno u otro tipo de TBM debe analizarse el túnel como un conjunto, ya que este normalmente el túnel tendrá varios kilómetros de longitud y por ende, existirán condiciones geotécnicas variables
- ✓ El estudio pormenorizado de las condiciones geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas, permitirá identificar y sectorizar los riesgos constructivos existentes
- ✓ Este análisis posee una importancia decisiva a la hora de elegir uno u otro tipo de TBM, pudiendo establecerse dos estrategias distintas:
  - ✓ **Estrategia de menor riesgo:** seleccionando la TBM más adecuada a las peores condiciones previsibles
  - ✓ **Estrategia de menor plazo:** seleccionando la TBM que arroje el mejor ARA, es decir el menor tiempo de construcción

## El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

#### 4. El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

- ✓ El túnel de Gudauri forma parte del “North-South Corridor (Kvesheti-Kobi) Road Project” en la República de Georgia, constituyendo una importante mejora en el sistema de transporte por carretera del país
- ✓ Este tramo posee actualmente una intensidad de tráfico diaria de 3.000-4.000 vehículos de los que el 30 % son vehículos pesados, no siendo posible mantener la carretera operativa durante los meses invernales
- ✓ El trazado finalmente aprobado implica una solución en túnel de 8.895 m de longitud que atraviesa de N a S la cordillera del Cáucaso, con cimas superiores a los 5.000 m de altitud, atravesando una orografía que supera en algunas zonas los 1.100 m de recubrimiento



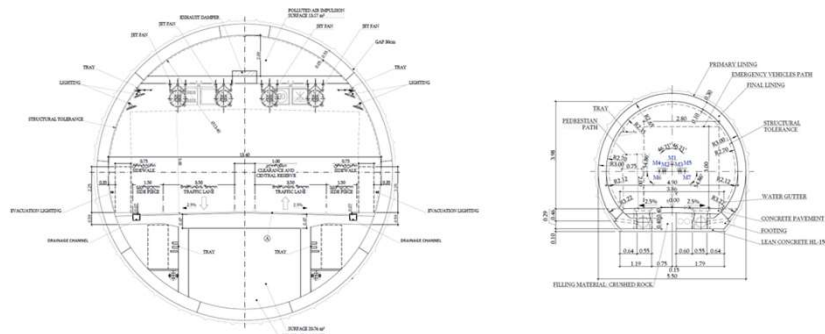
<https://youtu.be/UUbom3yIMm4>

- ✓ La Ingeniería de Detalle del Túnel Gudauri ha sido desarrollada por Idom y Subterra (Peral *et al.* (2019). “Túnel de Gudauri , un proyecto singular en un macizo calcáreo con recubrimientos superiores a los 1.000 m”. Ingeopres IG 275, pp 8 – 18.)

#### 4. El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

##### Definición geométrica

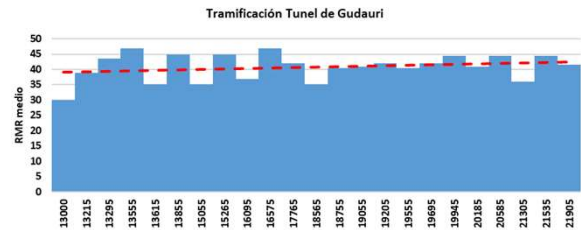
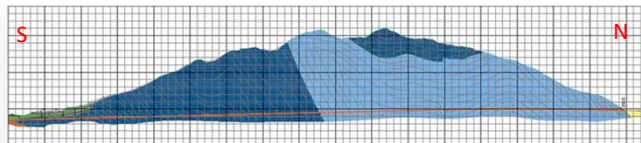
- ✓ El túnel se ha diseñado para tráfico bidireccional de una pista por sentido con una galería de evacuación paralela a 37 m de distancia, con conexiones cada 500 m y vehiculares cada 1.500 m
- ✓ La calzada, de acuerdo a la PIARC, posee un gálibo de 5 m y una anchura de 11 m (Dos bermas de 1,5 m, 3,5 m para cada pista y 1,0 m en la mediana). Además existen dos veredas de 0.75 m. Todo ello en una sección circular de 13,4 m de diámetro interior.
- ✓ La galería aloja un pasillo peatonal de 0.75 m y una pista de 2,8 m y respeta un gálibo vertical de 3 m



### 4. El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

#### Geología y geotecnia

- ✓ El Cáucaso se formó por colisión de la placa árabe contra la placa euroasiática. Los bloques de Anatolia-Turquía e Irán, en ambos costados, impiden la subducción. Es una zona de fuerte sismicidad y con algunos estratovolcanes
- ✓ El túnel está en el alóctono jurásico de un cabalgamiento de vergencia S. En él puede diferenciarse un nivel inferior formado por margas, calizas y lutitas y otro superior de lutitas. Los 500 m más meridionales, corresponden a tobas y lavas basálticas y andesíticas, de textura porfídica



El valor del RMR de Bieniawski oscila entre 20 y 65 puntos

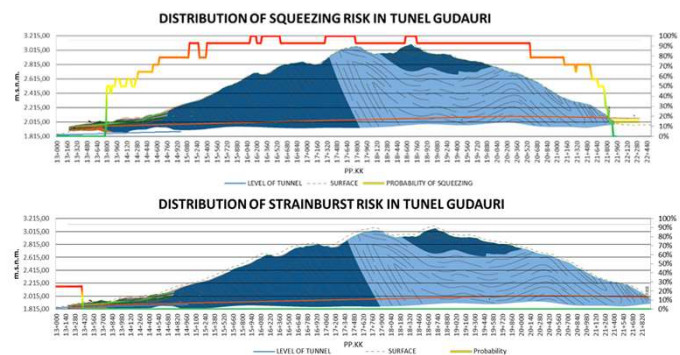
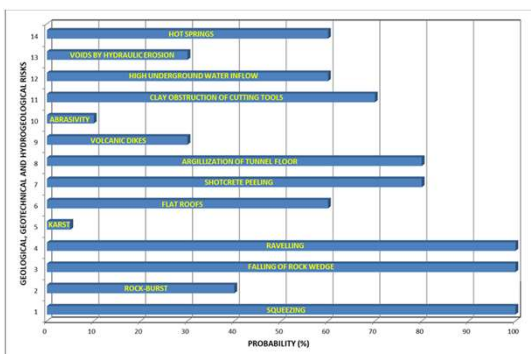
- ✓ El estudio sísmico determinó una Aceleración Máxima de 0,372 g, considerándose una desangulación  $\theta_s = 2,59 \times 10^{-4}$ .
- ✓ El campo de esfuerzos natural adoptado corresponde a una distribución  $K_0$  de 1,5 en la dirección E-W y N-S.

Cob. (m)	Ud.	Parámetros geomecánicos							Mohr-Coulomb	
		$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	GSI	$\sigma_c^i$ MPa	Ei MPa	$\mu_i$	D	E <sup>m</sup> MPa	C MPa	$\phi$ (°)
700	Jl	26.5	55	45	35	8	0	14.289	1.9	33
1100	Jm	26	55	55	40	7	0	16.331	2.5	30

### 4. El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

#### Análisis de riesgos

- ✓ El análisis de riesgos se efectuó de acuerdo a las recomendaciones de la ITA



- ✓ El estudio hidrogeológico reveló flujos potenciales de infiltración entre 281-523 l/s en el portal sur, y de 130-241 l/s en el portal norte, con un promedio de caudal acumulado durante la excavación de 587 l/s  $\pm 30\%$ .
- ✓ La ejecución de la Galería de Emergencia con carácter previo, servirá para evaluar el conjunto de riesgos y establecer medidas de actuación respecto a la ejecución del túnel principal.

#### 4. El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

##### Selección de la TBM

Los principales factores considerados en la elección de la máquina fueron:

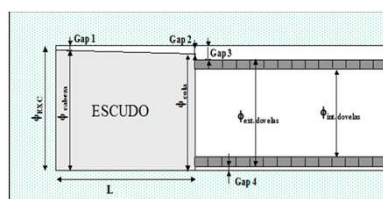
- ✓ Resistencia a compresión simple en rangos entre 40-90 MPa (40-50 MPa)
- ✓ RME comprendido entre 44 a 61
- ✓ Máximo recubrimiento de 1.100 m con  $K_o=1,5$ , y potencialidad de squeezing
- ✓ Existencia de incertidumbres en ciertos sectores, en el RMR, presencia de fallas, caudales y presiones de agua

Para la estimación de rendimientos se determinaron los AR para los tres tipos de TBM. Finalmente se consideró la tipología de **TBM de escudo simple** como la más idónea en base a las siguientes consideraciones:

- ✓ El rango previsible de RME supone un escenario en el que un Escudo Simple es competitivamente superior en rendimiento - coste frente una TBM de doble escudo
- ✓ El riesgo de atrapamiento es un factor importante. La menor longitud de un escudo simple supone una clara ventaja
- ✓ El riesgo de presencia de presiones de agua elevadas también favorece el empleo de un escudo simple

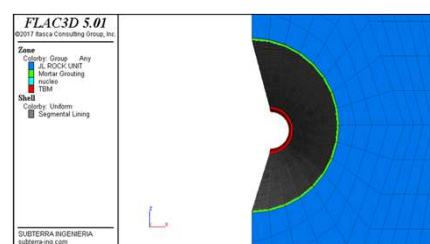
##### Características geométricas

Descripción	Valor
Diámetro nominal de excavación (m)	14,86
Diámetro del escudo	14,81
Longitud del escudo	15
Diámetro de la dovela	14,4
Gap sobre excavación	0,112
Gap 1	0,025
Gap 2	0,065
Gap 3	0,275
Gap 4	0,185



#### 4. El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

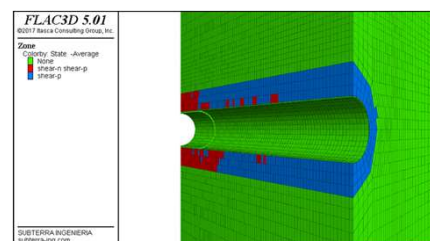
##### Selección de la TBM



##### Características de la TBM

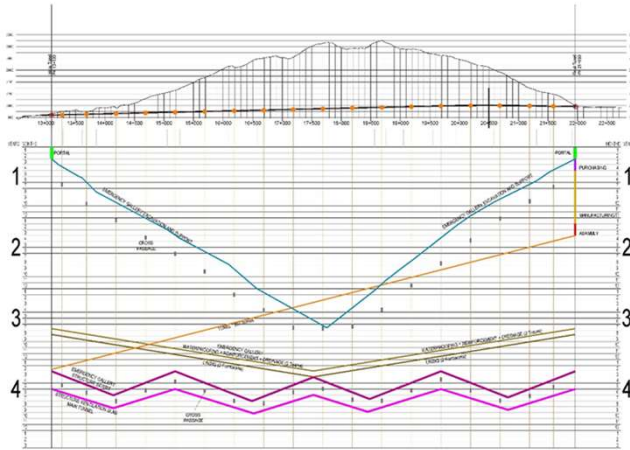
- ✓ La TBM irá equipada con 19 cilindros, con un empuje total de 11.628 t, con un empuje extra del 20% para caso de atrapamiento
- ✓ El torque nominal será de 13.500 kNm
- ✓ La potencia total instalada será de 4.900 kW
- ✓ Los discos cortadores serán de 19" con copy cutters para sobreexcavar 112 mm

##### Análisis del riesgo de atrapamiento



#### 4. El Túnel de Gudauri (Cáucaso, Georgia)

##### Método constructivo



RMR	RME	ARA <sub>R</sub> (m/día)	Aplicación (%)	Aplicación (m)	Tiempo (días)
>65	57	13,7	0%	0	0
55-65	52	13,9	10%	900	65
45-55	56	14	39%	4270	305
30-45	56,5	13,6	50%	3547	261
<30	46	3,9	2%	144	37

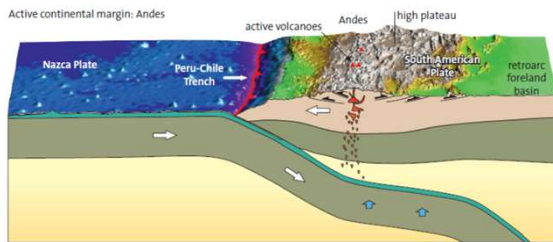
- ✓ Para la galería de evacuación se prevé un plazo de 2,5 años atacando desde ambos portales con NATM
- ✓ La TBM iniciará su trabajo tras 15 meses, terminando en el mes 38
- ✓ El plazo previsto para el conjunto de la obra es de 46 meses
- ✓ El contrato de construcción fue adjudicado en 2019 a China Railway 23 BG en 400 M USD

## El uso de las TBMs en túneles en los Andes

## 5. El uso de las TBM en túneles en los Andes

### ¿Por qué Los Andes?

- ✓ Los Andes es una de las grandes cordillera de la orogenia alpina formada por el levantamiento ocasionado al subducir la placa pacífica bajo la Sudamericana. Es muy joven, solo 60 ma.
- ✓ Es una cordillera activa:
  - ✓ Sismos
  - ✓ Esfuerzos horizontales muy elevados
  - ✓ Orografías muy acusadas
  - ✓ Presencia reducida de zócalo



Webinar Túneles con TBM - Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería

www.ctes.cl

## 5. El uso de las TBM en túneles en los Andes

### Base de datos. Experiencias anteriores a 2006

- ✓ Hasta el 2006 las experiencias de túneles construidos con TBM en la cordillera alcanzaban 112 km, pero eran:
  - ✓ mayoritariamente de reducido diámetro (solo dos casos con  $\varnothing > 5$  m) y
  - ✓ con TBM abierta (únicamente tres casos con Doble escudo)
- ✓ En varios casos las TBM no completaron su cometido

Túnel	País	Longitud (km)	Diámetro (m)	Tipo TBM	Resultado
Yacambú-Q	Venezuela	24	4,5	Abierta	✗
Rosales	Colombia	9,1	3,54	DSU	✓ ✗
Pappallacta	Ecuador	6,2	3,2	Abierta	✗
Manabí	Ecuador	11,4 + 4,1	4,04	DSU	✓
S Francisco	Ecuador	9,7	7,05	DSU	✓
Carhuaquero	Perú	6,5	3,8	Abierta	✓
Chimay	Perú	4,0	5,7	Abierta	✓
Yucán	Perú	6,5	4,1/3,5	Abierta (2 uds.)	✓ ✗
Misicuni	Bolivia	19,5	3,5	Abierta (2 uds.)	✗
Río Blanco	Chile	11,0	4,58	Abierta	✓ ✗

Webinar Túneles con TBM - Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería

www.ctes.cl

## 5. El uso de las TBM en túneles en los Andes

### Base de datos. Experiencias posteriores a 2006

- ✓ Después de 2006 se han construido 73,6 km adicionales (sin Alto Maipo ni Majes, en construcción):
  - ✓ Existe experiencia con todo tipo de TBMs, aunque la máquina más empleada es el Doble Escudo
  - ✓ Únicamente en uno de los túneles (El Volcán) de Alto Maipo, la TBM ha sido sacada; aunque ha sido sustituida por un Escudo Simple
- ✓ Al terminar las obras en marcha, se dispondrá de un base de datos de unos 300 km de longitud

Túnel	País	Año	Longitud (km)	Diámetro (m)	Tipo TBM	Resultado
Olmos	Perú	2008-12	11	4,58	Abierta	✓ x
Los Bronces	Chile	2009-11	8	4,5	DS híbrido	✓ x
Chacayes	Chile	2012-15	10	5	Abierta	✓ x
Coca Codo S	Ecuador	2012-15	13,8+9,6	9,04	DSU	✓
Minas-S Fco.	Ecuador	2014-17	10,8	5,67	DSU	✓
Alto Maipo	Chile	2015-	60	4,1-6,93	Abierta/DS/ES	✓ x
Cóndores	Chile	2016-19	10,4	4,56	DSU	✓ x
Majes - S	Perú	2017-	6,3+9,5	5,76	ES	✓

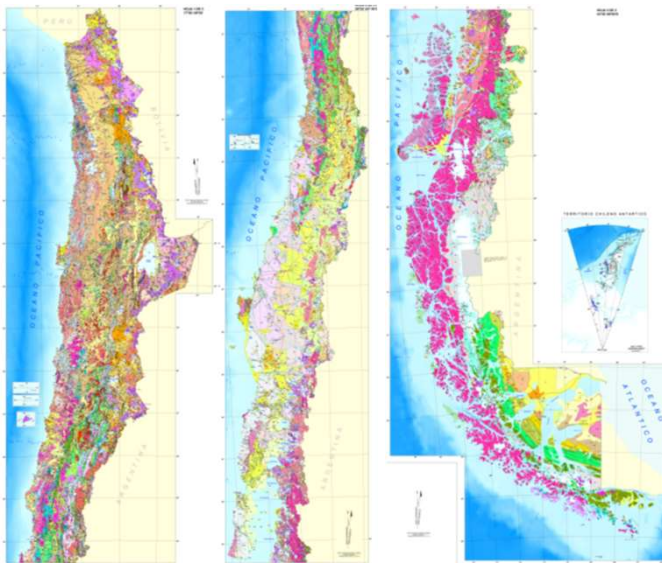
## 5. El uso de las TBM en túneles en los Andes

### Base de datos. Litologías

Desde el punto de vista geológico las formaciones atravesadas en estos 300 km, pueden clasificarse en:

- ✓ Rocas intrusivas de edad cretácica y terciaria (Minas SF)
- ✓ Rocas volcánicas del Cretácico, Terciario y Cuaternario (AM)
- ✓ Rocas volcano-sedimentarias, de edad cretácica, terciaria y cuaternaria (RB)
- ✓ Rocas sedimentarias, mayoritariamente del Paleozoico y Mesozoico (AM)
- ✓ Rocas metamórficas, del Paleozoico (Ma)

Sernageomin (2000)



### 5. El uso de las TBM en túneles en los Andes

#### Lecciones aprendidas 1a

En las experiencias a la fecha, los problemas detectados pueden agruparse en seis grandes categorías:

Squeezing	Rockburst	Fallas	Agua	Sobrexcauciones	Expansividad
Si la convergencia es grande, el terreno llega a atrapar la cabeza, si la TBM no posee empuje y par suficientes	con altos esfuerzos y rocas de alta resistencia y rigidez ... McNally, etc	con gauge milonítico o cataclástico, agua, ... pueden requerir tratamiento por delante de la TBM	Flujos de varias decenas de l/s entorpecen la operación, llegando a interrumpirla, requiriendo inyecciones	En terrenos fracturados, y desfavorable orientación se generan cuñas, ...	En presencia de minerales arcillosos expansivos o de poca durabilidad.



Webinar Túneles con TBM - Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería

www.ctes.cl

### 5. El uso de las TBM en túneles en los Andes

#### Lecciones aprendidas 1b

Proyecto	Y-Q	R	P	Ma	SF	C	CH	Y	Mi	RB	O	LB	CH	CCS	MSF	AM	LC	M-S
Squeezing	X	X							X									
Estallidos roca											X						X	
Fallas			X					X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Agua			X					X	X			X	X				X	
Sobrex./Desp.									X		X	X						X
Expans./Durab.										X								

- ✓ Los problemas más frecuentes son la presencia de fallas y agua, y en menor medida sobrexcaución y squeezing
- ✓ El desempeño neto promedio es de 335 m/mes, siendo a la fecha los DS los que proporcionan un mayor rendimiento (CCS 475 m/mes)



Webinar Túneles con TBM - Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería

www.ctes.cl



## 5. El uso de las TBM en túneles en los Andes

De las experiencias a la fecha, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

**Lecciones aprendidas 2**

✓ Respecto del tipo de TBM:

- ✓ Hasta el 2006 casi el 70 % de los túneles excavados con TBM, lo fueron con una TBM abierta. En la década siguiente ese porcentaje disminuyó hasta el 33%, siendo el 67 % de los casos excavados un Doble Escudo
- ✓ A día de hoy están operando, una TBM abierta, un Dobles Escudos y tres Escudos Simples

✓ Respecto a las características mecánicas de las TBM,

existe una clara tendencia a que se incremente su empuje y torque:

Proyecto	Diámetro (m)	Potencia (kW)	Torque (kNm)
Río Blanco	4,58	1.500	1.000
Chacayes	5,00	1.280	1.295
Alto Maipo	4,13	1.700	1.564

✓ Respecto de los problemas durante la excavación:

- ✓ La calidad de la roca, en especial con fallas importantes, limita el uso de una TBM abierta, siendo los Dobles Escudos y Escudos simples opciones menos vulnerables
- ✓ Las experiencias con Doble Escudo han sido positivas, sin que a la fecha se hayan reportado atrapamientos
- ✓ Existe aún pocas experiencias con un escudo Simple, pero a priori estas son positivas

## Conclusiones

## 6. Conclusiones

- ✓ Existen **tres tipos básicos de TBM** de “roca”: abierta, Escudo simple, y Doble Escudo
- ✓ La selección de uno u otro tipo de TBM debe estar sustentada por un **detallado estudio geológico, hidrogeológico y geotécnico**, un análisis de riesgo y en la evaluación de la estabilidad de la frente de excavación, el tiempo de autoestabilidad y la competencia de las paredes del túnel para apoyarse en ellas
- ✓ Adicionalmente deben evaluarse los esfuerzos naturales en relación al riesgo de ante condiciones extremas tales como squeezing (atrapamiento de la TBM) o rock bursts
- ✓ El **RME** constituye una herramienta muy útil que permite **estimar el AR (m/día)** previsible a partir de las características del terreno y del tipo de TBM que se emplee
- ✓ Para la selección de la TBM se plantean **dos posibles estrategias**:
  - ✓ la de **minimizar el riesgo**, escogiendo la más TBM más segura ante las situaciones existentes más desfavorables
  - ✓ La de **optimizar el plazo**, escogiendo la TBM más veloz.

## 6. Conclusiones

- ✓ El **Túnel de Gudauri**, en la cordillera del Cáucaso, posee unos condicionantes similares a un túnel andino (sobrecarga, sismicidad, agua, squeezing, ...). A partir del análisis de riesgos, se decidió el uso de un Escudo simple, dimensionando las características de la máquina de acuerdo al riesgo de atrapamiento, y el anillo de dovelas para su manipulación, empuje de los gatos, acciones del terreno, y para su vida útil por cargas sísmicas.
- ✓ En relación a la **aplicación de las TBM en los Andes**:
  - ✓ Hasta el 2006 se habían construido unos 112 km, mayoritariamente con un diámetro inferior a 5 m y con TBM abierta (solo tres casos con Doble escudo). En varios casos las TBM no completaron el túnel
  - ✓ Desde 2009, la máquina más empleada ha sido el Doble escudo, y el desempeño neto promedio es de 335 m/mes, con un máximo de 475 m/mes
  - ✓ A día de hoy hay una TBM abierta, un Doble Escudo y tres Escudos Simples en operación
  - ✓ Existe una clara tendencia a incrementar el empuje y torque de las TBMs
  - ✓ Los problemas más frecuentes son la presencia de fallas y agua y en menor medida, la sobrexcaución y el squeezing
  - ✓ La calidad del terreno, en especial si existen fallas importantes, limita el uso de las TBMs abiertas, siendo los Dobles Escudos y Escudos simples opciones menos vulnerables, debiendo evaluarse el riesgo de atrapamiento

